



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Even Kirs

HOONE AEROFOTOGRAMM-MEETRILINE MÕÕDISTAMINE UAV-GA

UAV-Based Photogrammetry for Surveying of a Building

Magistritöö

Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Aive Liibusk, *PhD*

Kaasjuhendaja: Marek Viitkin

Tartu 2019

EESTI MAAÜLIKOOL Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: EVEN KIRS		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Hoone aerofotogramm-meetiline mõõdistamine UAV-ga			
Lehekülgi: 76	Jooniseid: 63	Tabeleid: 7	Lisasid: 3
Õppetool: Geomaatika ETIS-e teadusvaldkond ja CERC-S kood: 4.Loodusteadused ja tehnika, Geodeesia (P515) Juhendajad: dotsent Aive Liibusk, PhD ja Marek Viitkin Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2019			
<p>Magistritöö eesmärgiks oli uurida UAV kasutusvõimalusi hoone, selle fassaadi ja katusepinna täpseks mõõdistuseks mitte orbitaalsel aerofotogramm-meetrilisel meetodil. Eesmärgi saavutamiseks teostati andmete kogumised uuritavast objektist aerofotogramm-meetrilisel ja terrestrialse laserskaneerimise meetodil. Uuriti, kas aerofotogramm-meetiline mõõdistus on sama täpne, odavam ja kiirem alternatiiv terrestrialsest laserskaneerimisest. Andmetöötluse tulemusena saadi mehitamata õhusõiduki tehtud piltidest punktipilv, mida võrreldi laserskaneerimise teel saadud punktipilvega. Tööst selgus, et aerofotogramm-meetria kasutamine hoonete mõõdistamisel on kindlasti kiirem, lihtsam ja odavam alternatiiv kui kasutada elektrontahhümeetrit või laserskannerit. Aerofotogramm-meetrilisel meetodil mõõdistatud punktipilvel oli detailne maapind ja katus, kehvem fassaad. Terrestrialse laserskaneerimise puhul oli fassaad hea kuid tehnoarajatiste tõttu katus kehvem. Kehvema aerofotogramm-meetrilise meetodi punkipilve tiheduse tõttu fassaadil ei saa selle töö puhul öelda, et see meetod on sama täpne ja kvaliteetne kui terrestrialse laserskanneri puhul, küll aga on mitte orbitaalse aerofotogramm-meetrilise meetodi kasutamine suurte hoonete puhul piisav, näiteks ehitusmaterjalide mahtude leidmiseks hoone renoveerimisel.</p>			
Märksõnad: aerofotogramm-meetria, droon, UAV, punktipilv			

ESTONIAN UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: EVEN KIRS		Speciality: Land surveying and land management	
Title: UAV-Based Photogrammetry for Surveying of a Building			
Pages: 76	Fixtures: 63	Tables: 7	Appendixes:3
Chair: Geomatics			
Field of research and (CERCS) code: 4. Natural sciences and Engineering, Geodesy (P515)			
Supervisors: Associate Professor Aive Liibusk, PhD, Marek Viitkin			
Place and date: Tartu 2019			
<p>The aim of the current Master's thesis was to find out UAV usage options for the building's, its facade's and roof area's precise surveying with the help of aero-photogrammetric method. To achieve the aim data was collected from the object under study using the aerophotogrammetric and terrestrial laser scanning methods. It was studied if the aero-photogram surveying is a precise, cheaper and faster alternative from the terrestrial laser scanning. As a result of the data processing the point cloud, which was taken by an unmanned aerial vehicle, was compared with the point cloud, which was taken by laser scanning. The study showed that using aerophotogrammetry in surveying of buildings is definitely faster, easier and cheaper than using the electrontachometer or the laser scanner. On the point cloud surveyed by aerophoto-grammetric method there was detailed ground and the roof, but the worse facade. As to the terrestrial laser scanning, the facade was good, but the roof was worse because of engineering constructions. Because of the worse density of the UAV point cloud on the facade of the building one cannot say according to this study that the method of aerophotogrammetry is as precise as using the terrestrial laser scanner. However the use of non-orbital surveying is accurate enough, for example, to find the volume of building materials when renovating a building.</p>			
Keywords: aerophotogrammetry, drone, UAV, point cloud			

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	6
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	8
2.1. UAV ajalugu.....	8
2.2. UAV klassifitseerimine ja ülevaade	10
2.3. UAV kasutusvõimalused	13
2.4. UAV kasutamine hoonete mõõdistamisel	15
2.4.1. Fotode ülekattuvus.....	23
2.4.2. Lennu kõrgus ja kaamera nurk	24
2.4.3. Markeerimispunktide kasutamine	28
2.4.4. UAV mõõdistamise täpsus	31
3. KASUTATUD RIIST- JA TARKVARA.....	33
3.1. Töös kasutatud instrumendid.....	33
3.2. Töös kasutatud järeltöötlustarkvara.....	37
4. METOODIKA	39
4.1. Mõõdistatav objekt	39
4.2. Välitööde kirjeldus	40
4.2.1 Hoone pildistamine UAV-ga.....	40
4.2.2 Joone laserskaneerimine Trimble SX10-ga.....	43
4.3. Andmete töötlus.....	45

5. MÕÕTMISTULEMUSTE ANALÜÜS	48
5.1. Absoluutse täpsuse hinnang.....	58
5.2. Kahe punktipilve omavaheline võrdlus programmiga <i>CloudCompare</i>	59
5.3. Meetodite kokkuvõttev arutelu	61
KOKKUVÕTE	64
SUMMARY	66
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	68
LISAD	72
Lisa 1. Georefereerimise tulemused	73
Lisa 2. Relatiivse täpsuse uurimisel mõõdetud joonepikkused. Ühikud meetrites.	75
Lisa 3. Absoluutse täpsuse uurimisel mõõdistatud koordinaadid	76

1. SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö teemaks valiti hoone aerofotogramm-meetiline mõõdistamine UAV ehk mehitamata õhusõidukiga. Antud teema on aktuaalne, sest mehitamata õhusõidukeid võetakse üha rohkem erinevates valdkondades kasutusele – nii ka geodeesias. Teema on uudne, kuna hetkel puuduvad Eestis uuringud, kus oleks uuritud UAV mõõtmisandmete põhjal loodud hoonete punktilvede täpsust. Vajadus hoonete ja nende fassaadide mõõdistamiseks on erinev ja nõudlus selle vastu suureneb pidevalt. Hooneid mõõdistatakse enne renoveerimist, et anda sisend projekteerijale, inventariseerimiseks, deformatsioonide uurimiseks, digitaalseks talletamiseks ja tõetruude 3D mudelite ja punktilvede saamiseks.

Hoonete mõõdistamiseks on aja jooksul kasutatud tahhümmeetrist mõõdistust. Viimastel aastatel on arenenud ka terrestriiline laserskaneerimine. Eelnimetatud meetodid on tihtipeale aeganõudvad ja kõrghoonete ning katusepindade puhul keerukad. Sellest tulenevalt soovitakse uurida UAV kasutusvõimalusi hoone, selle fassaadi ja katusepinna täpseks fotogramm-meetriliseks mõõtmiseks. UAV-ga mõõdistamine insenerivaldkonnas pole ennast siiani tõestanud ning inimesed on sel teemal lahkavamustel. Töö eesmärgiks on uurida UAV kasutusvõimalusi hoone, selle fassaadi ja katusepinna täpseks mõõdistuseks mitte orbitaalsel aerofotogramm-meetrilisel meetodil. Käesolevas töös esitatakse hüpotees, et hoone mõõdistamine mitte orbitaalsel aerofotogramm-meetrilisel meetodil UAV-ga on sama täpne, vähem aeganõudvam ja odavam kui elektrontahhümeetri ja laserskanneriga mõõdistamine.

Käesolev töö on jaotatud kaheks osaks: teoreetiliseks ja empiiriliseks. Teoreetilises osas antakse ülevaade mehitamata õhusõidukite ajaloost, klassifitseerimisest ja nende kasutusvõimalustest. Peatükis UAV kasutamine hoonete mõõdistamisel kirjeldatakse võrreldavate autorite uurimuste ja artiklite näitel kuidas mehitamata õhusõidukidega hooneid on varasemalt mõõdistatud: millised on piltide ülekattuvused, lennu kõrgused ja kaamera nurgad. Lisaks räägitakse markeerimispunktide kasutamisest ja tuuakse näiteid milliseid täpsusi on UAV-ga mõõdistamisel saavutatud.

Empiirilises osas antakse ülevaade läbiviidud mõõdistamisest. Kasutatud riist- ja tarkvara peatükis kirjeldatakse kasutatud seadmeid ja järeltöötlustarkvara. Metoodika peatükis kirjeldatakse uuritavat objekti ning mõõdistuste läbiviimiste protsesse. Objekti pildistades kasutati 70° kaamera nurka, lennates piisavalt kõrgel, et tagada tiheastustatud alal ohutu

lend. Orbitaalne lend välistati, kuna sageli on linnades ja teistes tiheasustusega aladel raske kui mitte võimatu orbitaalselt ümber hoone lennata, samas soovitakse koguda võimalikult detailset informatsiooni ka hoone fassaadi kohta. Sellest tulenevalt teostati ka käesolevas töös „*grid*“ stiilis trajektooriga lendamine hoone kohal, et saada hinnang sellise mõõtmisviisi täpsuse kohta. Peatükis „Mõõtmistulemuste analüüs“ analüüsitakse saadud punkt pilvi ja nende täpsusi. Teostatud mõõtmiste ja nende täpsuste kohta on koostatud joonised ja tabelid. Töö lõpus on ettepanekud edaspidiseks.

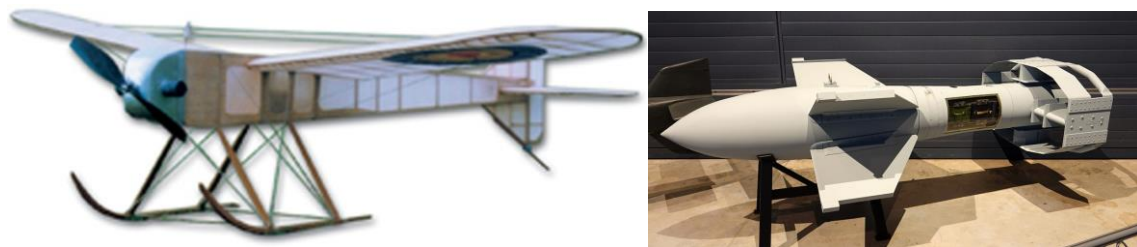
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1. UAV ajalugu

Lühend UAV tuleneb terminist *Unmanned Aerial Vehicle*, mis tähendab tõlkes mehitamata õhusõidukit. See tähendab seda, et pardal ei ole pilooti. Lennumasin võib töötada iseseisvalt või tegeleb piloot kaugjuhtimisega eemalt (Raczynski, 2017).

UAV-d või selle ideed võib võrrelda lennunduse vanusega. Teadaolevalt tegi esimesed aerofotod kuumaõhupallilt Gaspard Tournachon 1858. aastal Pariisi kohal. Lisaks on ajaloos kasutatud pildistamiseks isegi lindude ja tuulelohede külge monteeritud kaameraid.

Tänapäevasemate mehitamata õhusõidukite juured on militaarvaldkonnas, kust tuleb ka termin *dröon*. Katsetusi tõelise mehitamata õhusõiduki ehitamiseks tehti juba esimese maailmasõja ajal. 1917. a ehitati *Ruston Proctor Aerial Target* (vt joonis 2.1), mis oli esimene reaalselt lendav mehitamata lennusõiduk, kuid mida sõjaolukorras reaalselt kasutama ei hakatud. 1943. aastal ehitati Saksamaal mehitamata tiibrakett *Fritz X* (joonis 2.1), mida kasutati mehitamata õhusõidukite maailmas. Kaugjuhitavat raketti kasutati laevade pommitamiseks (vt. joonis 2.1) (History of...).



Joonis 2.1. Vasakul *Ruston Proctor Aerial Target* ja paremal *Fritz X* [Allikad: Fritz X, The Predator's Ancestor]

Mikroprotsessorite areng 1960-ndatel andis tõuke mehitamata õhusõidukite kiirele arengule. Hobimudelite populaarsus Ameerikas kasvas 1980-ndatel hüppeliselt. Raadio teel juhitud mudelid olid tavakasutajale odavalt kättesaadavad. Sel ajal oli suureks puudujäägiks GPS. GPS muutus kõigile kättesaadavaks alles 1990-ndatel, mis parandas oluliselt õhusõidukite võimet enda asukohta määrata (Sõdur, 2014). 2000-ndate lõpus võimaldas elektroonika areng toota väiksemaid ja võimsamaid mikroprotsessoreid, kaameraid, GPS-süsteeme ja andureid, tänu millele ilmusid multirootor kopterid.

2006. aastal märkas Ameerika Ühendriikide Föderaalne Lennuamet potentsiaali UAV-de mitte-sõjalistel eesmärkidel kasutamises. Riiklik amet andis välja esimese regulatsiooni UAV-de kohta, mis vähendasid nende piiranguid. Tänu regulatsioonile avas see uusi võimalusi ettevõtetele ja spetsialistidele, kes soovisid kasutada UAV-si mitmesugustes ettevõtmistes (History of...). Esimene kaubanduslikult edukas tavatarbijale mõeldud UAV tuli müügile 2010. aastal. See oli esimene *ready-to-fly* komplekt, mis tähendas, et karbist välja võttes oli masin kohe lennuvalmis. Tegu oli Parrot AR 1.0 multirootor UAV-ga, mis oli juhitud Wi-Fi abil nutitelefoni abil (vt. joonis 2.2).



Joonis 2.2. Esimene tavatarbijale mõeldud *ready-to-fly* UAV Parrot AR 1.0 [Allikas: Parrot AR 1.0]

Murdeline hetk väikeste UAV-de arengus oli aastal 2013 kui Hiina tehnoloogiaettevõtte DJI esitles tänaseks kõigile tuntud *DJI Phantom 1* UAV-d (vt. joonis 2.3). Tänapäeval on DJI maailma absoluutne turuliider, omades 70 % selle valdkonna turuosast (Technode). Ettevõtte esitleb igal aastal uut mudelit, mistõttu on nende UAV-de valik mitmekülgne ja olenemata valdkonnast, tarbijate peamine valik.

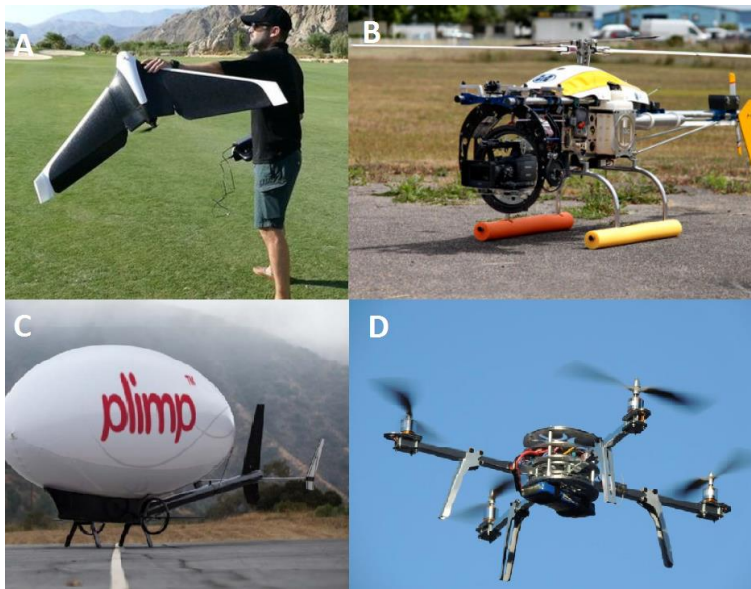


Joonis 2.3. DJI esimene droon *DJI Phantom 1* [Allikas: DJI]

2.2. UAV klassifitseerimine ja ülevaade

UAV-sid kasutatakse paljudes eri valdkondades, millest tulenevalt saab neid jaotada ehituse järgi erinevateks tüüpideks (vt. joonis 2.4) (Raczynski, 2017):

- mehitamata lennuk,
- mehitamata helikopter,
- mehitamata õhulaev,
- mehitamata multirootor õhusõiduk,
- muu mehitamata õhusõiduk.



Joonis 2.4. Mehitamata lennuk (A), mehitamata helikopter (B), mehitamata õhulaev (C) ja mehitamata multirootor õhusõiduk (D) [Allikas: Circuitstoday, Unmannedsystemtechnology]

Samuti võib mehitamata õhusõidukeid jagada kandevõime alusel (Raczynski, 2017):

- kuni 5 kg,
- 5 kg – 25 kg,
- 25 kg – 150 kg,
- üle 150 kg.

UAV-de klassifitseerimist pole ühtse standardina kokku lepitud, seega on klassifitseerimisvõimalusi ka mitmeid teisi. Lennumasinaid saab veel jaotada otstarbe, lennukestuse, lennuulatuse, hinna, võimsuse ja kaalu järgi. Kõige suuremad UAV-d kaaluvad mitu tonni ja suudavad järjest õhus olla enam kui ühe ööpäeva. Tuntuim selline mehitamata õhusõiduk on Ameerika Ühendriikide õhuväe ja NATO kasutuses olev *RQ-4 Global Hawk* (vt joonis 2.5). Tegu on kõrg- ja kaugluure vaatluslennukiga, mis suudab andmeid koguda iga ilmaga nii öösel kui päeval. Õhusõiduk kaalub ligikaudu 7 tonni ning on võimeline lendama 18 km kõrgusel. Selle tiivaulatus on 39,8 m ja pikkus 14,5 m (Air Force, 2014).



Joonis 2.5. *RQ-4 Global Hawk* mehitamata õhusõiduk [Allikas: Air Force, 2014]

Väikestest UAV-dest on tuntud kuni paari kilosed ja umbes 20-minutilise lennuajaga multirootor masinad, mis on tänapäeval väga levinud tsiviilkasutuses. Selle odav hind, mitmekülgne kasutusvõimalus ja lihtne juhtimine on teinud need populaarseks.

Eestis pole UAV samuti midagi uut. Eestis on kaks ettevõtet (Eli OÜ ja Threod Systems OÜ), mis ehitavad mehitamata õhusõidukeid. Lühikese aja jooksul on firmad välja töötanud arvestatava valiku mehitamata õhusõidukeid. Märkimisväärne on see, et väikesed Eesti firmad on piiratud vahenditega suutnud luua lennuvahendid, mille arendamiseks on suured riigid kulutanud oluliselt rohkem nii raha kui ka inimressurssi. Firmad on tootnud sisepõlemismootoriga luuredroone, multirootorkoptereid ja fikseeritud tiibadega lennumasinaid (Sõdur, 2014).

Eli OÜ üheks peamiseks tooteks on *Elix-XL* multirootor UAV (joonis 2.6). *Elix-XL*-i võib pidada lennuomaduste poolest oma klassi parimaks. UAV võimaldab 6 km lennuraadiust

ning 1-tunnist lennuaega, olles ise kerge ja kompaktne. Lisaks on UAV loodud kasutamiseks ekstreemsetes tingimustes. Andmeside UAV ja maapealse jaama vahel on krüpteeritud NATO standardite järgi. Lennumasin on varustatud tava- ja infrapuna kaameraga, mis võimaldab tööd teostada lisaks päevasele ajale ka öösel (Elix-XL Multirotor). *Elix-XL* UAV-si ostis ka Eesti Politsei- ja Piirivalveamet abivahendina piirialade seireks.



Joonis 2.6. Eli OÜ loodud *Elix-XL* multirootor UAV [Allikas: Elix-XL Multirotor]

Kui Eli OÜ oli peamiselt keskendunud militaar- ja julgeoleku valdkonnale omades ühte UAV-d, siis Threod Systems OÜ-l mehitamata lennumasinade valik suurem. Valikus on kolm fikseeritud tiibadega mehitamata lennukit ning kaks multirootorkopterit. Threod Systemsi multirootor kopterid on ehitatud samuti militaar- ja julgeoleku otstarbeks, kuid nende näitajad on natukene tagasihoidlikumad kui Eli OÜ lennumasinad. Threod Systems OÜ-l on aga mehitamata lennukid, millest võimsamad suudavad lennata üle 6 tunni, lennuraadiusega 100 km (Threod Systems). Antud lennukid on ette nähtud militaarvaldkonna seireks, turvalisuseks, päästetöödel või tsiviilvaldkonnas näiteks kaardistamiseks või õhuliinide inspekteerimiseks. Ettevõtte kõige võimsam mudel on Stream C UAS (joonis 2.7).



Joonis 2.7. Threod Systems OÜ loodud Stream C UAS [Allikas: Threod Systems]

2.3. UAV kasutusvõimalused

Mehitamata õhusõidukite tulek on vallutanud paljud majandussektorid. Algpäraselt kasutati neid peamiselt militaarvaldkonnas. Aja möödudes on mehitamata õhusõidukite kasutusvaldkond laienenud järjest rohkem tsiviilvaldkonda. Tänapäeval kasutatakse UAV-sid näiteks täppispõllumajanduses saagi kasvu monitoorimiseks või pestitsiidide pritsimiseks. Mehitamata õhusõidukiga mõõtmine on kasulik ka arheoloogiakaevamiste dokumenteerimisel ja kultuuripärandite modelleerimisel. Järjest rohkem kasutatakse UAV-d ka päästetöödel – inimeste otsimisel või tulekahju ulatuse monitoorimiseks. Lisaks on laialdaselt levinud UAV-de kasutamine meelelahutus- ja filmimaailmas (Raczynski, 2017). Suurte hoonete puhul, kus on tarvis testida soojuspidavust, on UAV asendamatult töövahend. Lisaks on UAV kasulik näiteks tuulegeneraatorite, tammide, elektriliinide ja sildade inspekteerimisel.

Viimased aastad on olnud UAV-de valdkonnas pöördelised. Järjest rohkem mõeldakse välja uusi innovaatilisi lahendusi, kuidas mehitamata lennumasinaid nutikalt ära kasutada. Globaalse droonituru hinnanguline väärtus aastaks 2020 on 127 miljardit dollarit (PwC). Tabelis 2.1 on välja toodud hinnangulise väärtuse jagunemine valdkonniti (vt. Tabel 2.1). Väärtus näitab selle valdkonna teenuste müügisummat.

UAV peamiseks eeliseks mehitatud õhusõiduki ees on see, et UAV-d saab kasutada kõrgendatud riskiga situatsioonides, inimelu ohtu seadmata. Mehitamata õhusõidukid saavad lennata raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse, võimaldades lennata madalal ja objektile lähedal, mis mehitatud õhusõidukite puhul oleks võimatu või ohtlik. Sellisteks piirkondadeks võivad olla näiteks mäestikud, vulkaanialad, üleujutusala, maavärinaalad, õnnetuspaigad. UAV on asendamatult alternatiiv kui mehitatud õhusõidukiga on protsesside läbiviimine keerukas või keelatud. Lisaks on võimalik UAV-ga lennata ja andmeid koguda pilvise või uduse ilma korral, kuna lend toimub madalal kõrgusel. Mehitatud lennumasina puhul on vajalik suurem lennukõrgus, mistõttu on pilvisus ja udu takistuseks. Lisaks on UAV kasutamise juures eelis selles, et piloote ei koormata suure hulga tervisenõuetega, erinevalt mehitatud lennukite pilootidest (Eisenbeiss, 2009).

Tabel 2.1. Globaalse droonituru hinnanguline väärtus aastaks 2020 ja selle jagunemine

[Allikas: PwC]

Valdkond	Rakendus	Hinnanguline väärtus teenuste müügisummas (miljardit dollarit)
Infrastruktuur	Ehitus, korrashoid, kaardistamine, uuringute tegemine, planeerimine	45,2
Põllumajandus	Mullastiku uurimine, taime kasvu ja tervise monitoorimine	32,4
Transport	Kauba kohaletoimetamine, meditsiiniline logistika	13
Julgeolek	Turvaseire ning ennetustegevus	10
Meedia ja meelelahutus	Reklaamid, filmindus, fotograafia	8,8
Kindlustus	Lisaväärtus kahjunõuete lahendamise protsessis, pettuste avastamine	6,8
Telekommunikatsioon	Telekommunikatsiooni mastide inspekteerimine	6,3
Kaevandus	Planeerimine, avastamine, keskkonnamõju hindamine	4,4

Üheks valdkonnaks, kus UAV on kasutusele võetud alles hiljuti, on geodeesia. Esialgu kasutati geodeesias mehitamata lennumasinaid lihtsamate maapinnamudelite tegemiseks. Aja möödudes on kasutusele võetud uusi ja innovatiivseid lahendusi. Geodeesia valdkonnas on võimalik tänapäeval UAV abil teostada topomöödistust, arvutada erinevaid mahtusid ja teha 3D-mudeleid erinevatest objektidest.

Lisaks asjaolule, et UAV-d saab saata sinna, kuhu inimest saata oleks liiga riskantne, on teiseks peamiseks faktoriks ajakulu. UAV-dega on võimalik saavutada tulemusi kiiremini. Suure maa-ala möödistamiseks tahhümmeetrilisel meetodil võib kuluda väga suurel hulgal inimtunde. Parema alternatiiv on terestiline laserskanneerimine, kuid ka see meetod nõuab palju tööd ning hilisem järeltöötlus on ajakulukas ja mahukas. Iga ettevõtte on huvitatud sellest, et saada piisava täpsusega andmeid odavalt ja kiirelt, mis teeb UAV-st sobiva abivahendi.

2.4. UAV kasutamine hoonete mõõdistamisel

Hoonete fassaadide mõõdistamiseks on aastakümneid kasutatud aeganõudvat tahhümmeetrilist mõõdistust. Viimastel aastatel on jõudsalt arenenud terrestriiline laserskaneerimine ja seda kasutatakse üha enam ka Eestis. Vähesel määral on katsetatud aerofotogramm-meetriat hoonete fassaadide mõõtmiseks. Terrestrilised mõõdistusviisid on küll väga täpsed, kuid nad on aeganõudvad ning kõrghoonete ja katusepindade mõõdistuse puhul on nende kasutamine sageli raskendatud.

Vajadus hoonete fassaadide mõõdistamiseks on väga erinev ja nõudlus selle järele suureneb pidevalt. Hooneid mõõdistatakse:

- 1) enne renoveerimist, et anda sisend projekteerijale;
- 2) inventariseerimiseks;
- 3) vajumiste ja deformatsioonide jälgimiseks;
- 4) muinsuskaitseobjektide digitaalseks talletamiseks;
- 5) tõetruude 3D-mudelite saamiseks.

Eriti keeruline on ajalooliste fassaadide mõõdistamine, mille kitsaskohaks on keeruline geomeetriline ja dekoratiivne struktuur. Lisaks on tavapärane, et sellistel uurimisobjektidel on erinevad keskkonnapiirangud, mistõttu on mõõdistusprotsess keerulisem. Tavaliselt kasutatakse hoonete mõõdistamiseks terrestriilist laserskaneerimist, kuid ka laserskaneerimise meetodil on omad miinused. Terrestrilise laserskaneerimise seade on kallis ja see nõuab rohkem inimtöötunde võrreldes UAV-ga teostatavast aerofotogramm-meetriaga. Lisaks võib keeruliste fassaadide puhul terrestrilise laserskaneerimisega tekkida andmekadu, mis on tingitud vaateväljast maapinna lähedal ja fassaadi iseärasuste koosmõjust.

Olgu siin näitena toodud 2018. aastal tehtud uuring Itaalias Bologna linnas, kus mõõdistati Villa Aldrovandi Mazzacurati hoonet, mis pärineb 17.sajandist (joonis 2.8). Neoklassitsismi stiilis hoone sisaldas endas sellele ajastule omaseid elemente, mis tegid uurimuse huvitavamaks, kuna taheti teada, kas kõik need elemendid tulevad välja ka mudelil.



Joonis 2.8. Villa Aldrovandi Mazzacurati [Allikas: Guido Barbi]

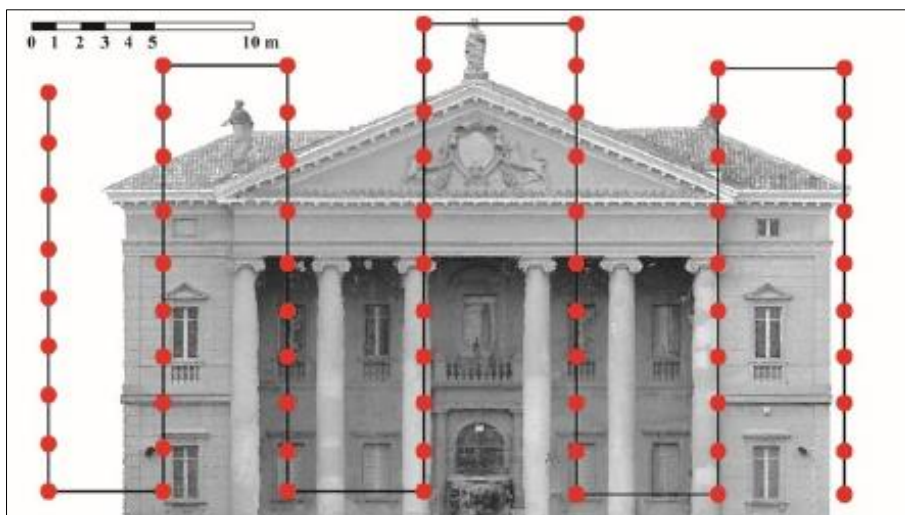
Hoone aerofotogramm-meetiline mõõdistamine fassaadist tehti DJI Spark UAV ja sellesse integreeritud kaameraga (vt. joonis 2.9).



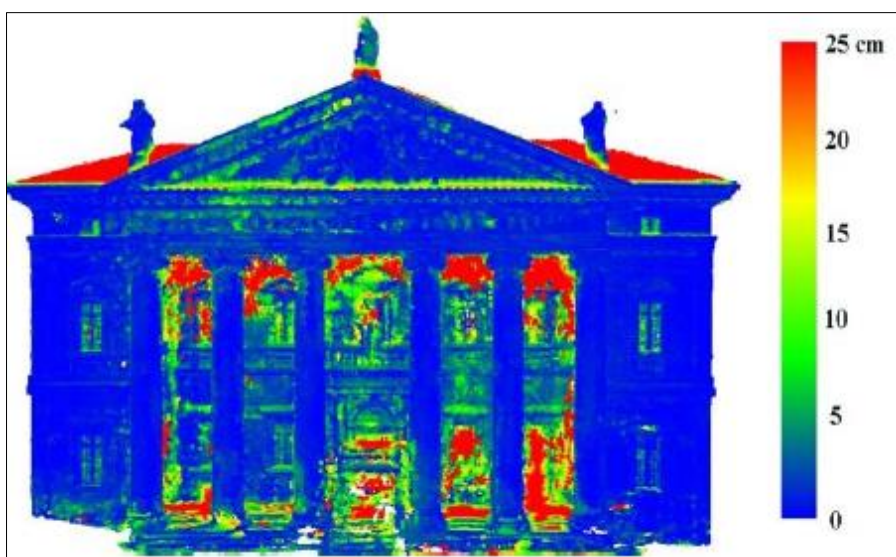
Joonis 2.9. DJI Spark UAV [Allikas: DJI Spark]

Tegu on kõigest 340 g kaaluva 4 rootoriga kopteriga, mille turuhind on umbes 500 eurot. Hoone esifassaadi mõõdistamiseks seati UAV distantis hoonest 10 m kaugusele. Sellelt kauguselt pildistades saadi GSD (*Ground Sample Distance*) 4 mm. GSD näitab kui suur on üks pildi piksel maapinnal. Joonisel 2.10 on näha lennu planeerimist. (Carnevali, et al., 2018)

Pildid tehti iga 2 m tagant, liikudes vertikaalselt üles ja alla ning paanide vahe oli 6 m. Tulemuseks saadi 80 % ülekattuvus vertikaalselt ning 60 % ülekattuvus horisontaalselt. Et fotogramm-meetrilisi tulemusi millegagi võrrelda, tehti ka 3D Faro terrestrial laser skanneriga mõõdistus. Piltide orienteerimiseks oli hoonel 31 markeerimispunkti, millest 14 kasutati andmetöötluseks. Kahe meetodi erinevuse visualiseerimiseks tehti värvimudel. Mudeli värviskaala näitab andmete erinevust (vt. joonis 2.11). (Carnevali, et al., 2018)



Joonis 2.10. Planeeritud lend fassaadi pildistamiseks [Allikas: Carnevali, et al., 2018]



Joonis 2.11. Terrestilise laserskaneerimise ja fotogramm-meetrilise mõõdistuse andmete erinevus [Allikas: Carnevali, et al., 2018]

Jooniselt 2.11 on näha, et hoone pealisfassaadi punktiväärtused omavahel ei erine. Erinevused tekivad hoone sissepoole ulatuvates osades. Sammaste taga olevas fassaadi osas tekkinud suurte erinevuste põhjuseks võib pidada halbu valgustingimusi, varje ning keerulist orienteerimist andmeid töödeldes. Katus on punane sellepärast, et terrestilise laserskaneerimisega ei saadud sinna väärtusi, erinevalt fotogramm-meetrilise mõõdistusest.

Aerofotode põhjal koostati värviline ortomosaiik, kust on näha, et fassaad on kujutatud tervikuna koos dekoratsioonide ja kujudega (vt. joonis 2.12).



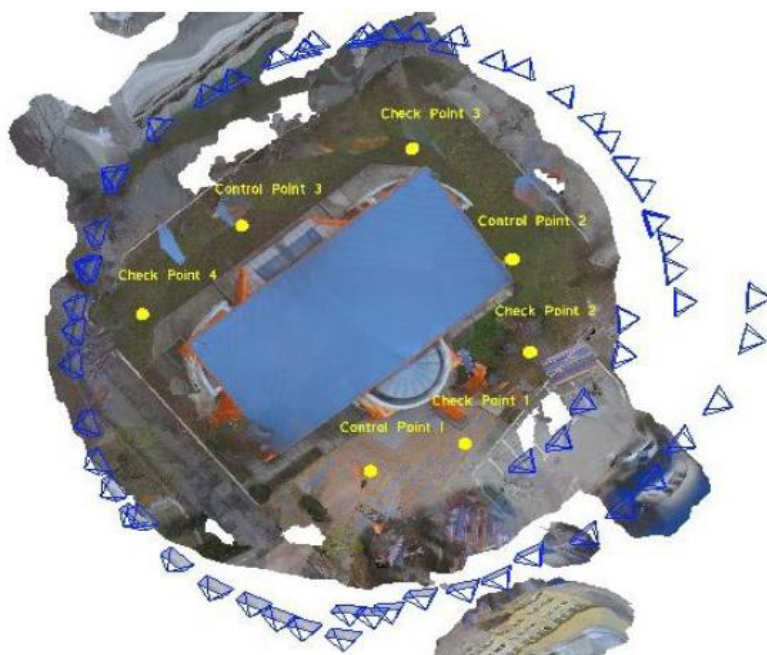
Joonis 2.12. Ortomosaiik uuritud hoonest [Allikas: Carnevali, et al., 2018]

Uurimuses saadud tulemused näitavad, et fassaadi mõõdistus on taskukohase ja väikese UAV-ga edukalt teostatav. Mõlema meetodi omavahelisel võrdlusel on kõrvalekalded suuremalt jaolt mõne sentimeetri piires, hoone sügavamas osas suuremad. Arvestada tuleb ka seda, et tegu on 500-eurose hobimasinaga. Kallimal UAV-l on kindlasti paremad omadused ja kaamerasensorid, mis tagavad eeldatavasti ka täpsema tulemuse.

Uurimusi hoonete fotogramm-meetrilise mõõdistamise täpsuse kohta on tehtud ka mujal. 2017. aastal mõõdistati fotogramm-meetrilise meetodiga Rumeenias asuvat Iasi Tehnikakõrgkooli hoonet. Hoone valiti oma keerulise kuju ja katuse struktuuri tõttu. Sellel on hüperboolne paraboloid ehk sadulkatus. Referentsmudeliks võeti terrestrialise laserskaneerimise andmed (Oniga, Chirilă, & Stătescu, 2017).

Uurimuse eesmärk oli hinnata nelja erineva modelleerimise tarkvara täpsust: *Zephyr*, *Visual SfM*, *PhotoModeler Scanner* ja *Drone2Map*. Fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel kasutati DJI Phantom 3 standard UAV-d, millel on integreeritud kaamera. Lennukõrguseks määrati 15 m, kaamera oli seatud 45° nurga alla ning lend toimus ringjooneliselt ümber hoone. Georefereerimiseks kasutati markeerimispunkte, mis selles uurimuses olid tehtud pleksiklaasist. Maapinnale paigutati seitse markeerimispunkti, millest andmetöötleses kasutati kolme. Lisaks mõõdistati Leica TCR 405 Total Station elektrontahhümeetri abil kümme lihtsasti äratuntavat punkti hoonel, nagu akna ja ukse nurgad. (Oniga, Chirilă, & Stătescu, 2017)

Et hinnata erinevate tarkvaradega tehtud punktipilvede täpsust, mõõdeti kontrollpunkte paika orienteeritud piltidelt ja võrreldi neid varem GNSS seadmega mõõdistatud koordinaatidega. Arvutustel kasutati *Check Point 1-4* (vt. joonis 2.13).



Joonis 2.13. Uuritava objekti pealtvaade, kus on näha orienteerimise kontrollpunktid (*Control point*) ja täpsuse hindamiseks kasutatud punktid (*Check point*). Sinised kolmnurgad tähistavad kaamera positsiooni ja asukohta. [Allikas: Oniga, Chirilă, & Stătescu, 2017]

Tabel 2.2. Kontrollpunktide võrdlemisel saadud keskmised ruutvead erinevate tarkvarade puhul [Allikas: Oniga, Chirilă, & Stătescu, 2017]

Tarkvara	Keskmine ruutviga (RMS)			
	$\Delta X[m]$	$\Delta Y[m]$	$\Delta Z[m]$	$D[m]$
Zephyr	0,016	0,009	0,013	0,023
PhotoModeler Scanner	0,013	0,017	0,009	0,024
Drone2Map	0,018	0,012	0,011	0,024
Visual SfM	-	-	-	-

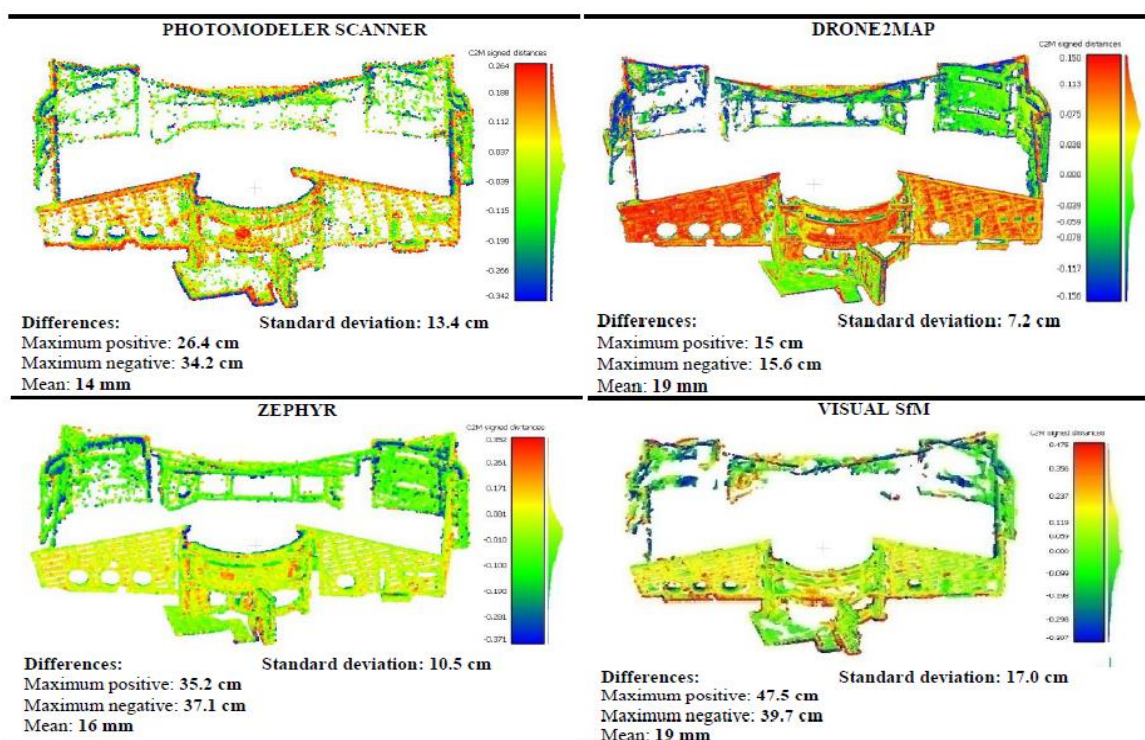
Tabelis 2.2 on välja toodud mõõtmiste X, Y, Z ja D keskmised ruutvead, kus D on arvutatud kahe paari koordinaatide omavahelisest kaugusest ruumis, kasutades valemit:

$$D = \sqrt{(X_r - X_i)^2 + (Y_r - Y_i)^2 + (Z_r - Z_i)^2} , \quad (1)$$

kus (X_r, Y_r, Z_r) on koordinaadid, mis on mõõdetud GNSS seadmega ja (X_i, Y_i, Z_i) on koordinaadid, mis on mõõdetud tarkvaras.

Visual SfM tarkvaras polnud võimalik kontrollpunkte võrrelda, kuna puude tõttu polnud tarkvara nendesse aladesse punkte genereerinud. Puude tõttu oli ka ülejäänud andmestik puudulik.

Tulemustes tõid autorid välja ka visuaalsed joonised, kus võrreldi mõõdistatud hoone punktipilvi referentspinna ehk terrestrialse laserskaneerimise võrgustikuga (vt. joonis 2.14).



Joonis 2.14. Genereeritud punktipilve ja referentspinna võrdlus [Allikas: Oniga, Chirilă, & Stătescu, 2017]

Joonis näitab, kuidas punktipilve punktid võrreldes referentspinna võrgustikuga asetsevad – sinine seespool ja punane väljaspool võrgustikku. Võttes arvesse protsesside automatiseeritust, ajakulu, punktipilve tihedust ja selle täpsust, reastasid autorid tarkvarad alustades parimast järgnevalt: Drone2Map, Zephyr, PhotoModeler Scanner ja Visual SfM.

Uurimusest selgub, et mingil määral sõltub mudeli täpsus ja visuaalne väljanägemine ka kasutatavast tarkvarast. Lisaks oli selles uurimuses üheks eesmärgiks kasutada ainult kolme markeerimispunkti, mille abil pildid koordinaatsüsteemi saada. Mõningad uurimuses kasutatud tarkvaradest on vabavarad ning Visual SfM-i puhul on tegu avatud lähtekoodiga programmiga. Võib eeldada, et kui kasutada rohkem markeerimispunkte ning töödelda andmeid tasulise programmiga, saaks paremad tulemused.

Hoonete mõõdistamise täpsust on uurinud ka mitmed teised teadlased. Oniga, Chirilă ja Stătescu (2017) ja Carnevali et al (2018) töödest ilmneb, et mida lihtsama pinnaga on mõõdistatava hoone fassaad, seda täpsem on aerofotogramm-meetrilisel meetodil mõõdistatud mudel võrreldes terrestrilisel laserskaneerimisel saadud mudeliga. Aerofotogramm-meetrilisel pildistamisel võivad nähtamatuks jääda hoone alumises osas olevad ukseavad, võlvid, sisseulatuva osad või varikatuse all olevad detailid. Terrestrilise laserskaneerimise meetodi miinuseks on see, et kõrgete hoonete puhul jääb hoone ülemises osas kogutav info puudulikuks või mõne katuse tüübi puhul täielikult puudu.

Mõlemat olukorda kirjeldab hästi Grenzdörffer, Naumann et al (2015) tehtud uurimus, kus terrestrilise laserskaneerimise ja aerofotogramm-meetrilise mõõdistuste võrdluseks oli valitud objektiks *St.Nicholas* katedraal Greifswalfi linnas, Saksamaal (joonis 2.15). Töö eesmärgiks oli teha korrektne mudel, kombineerides omavahel terrestri- ja aerofotogramm-meetriline laserskaneerimine ning välja selgitada ka mudeli täpsus.



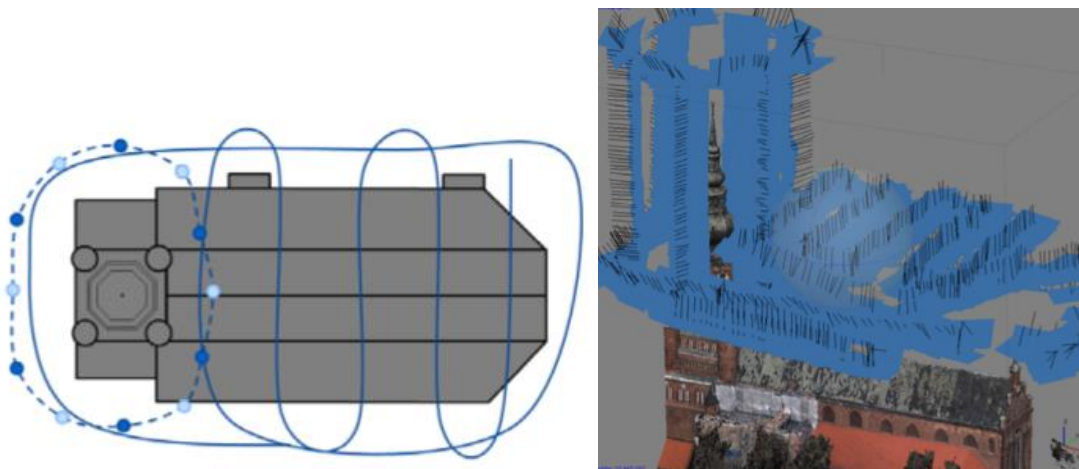
Joonis 2.15. *St.Nicholas* katedraal Greifswalfi linnas, Saksamaal [Allikas: Grenzdörffer, Naumann jt, 2015]

Katedraal on torni tipust mõõdetuna 97 m kõrgune. Terrestri- ja aerofotogramm-meetrilise laserskaneerimise tehti FARO skaneerijaga ning aerofotogramm-meetrilisel lennul kasutati UAS MD4-1000 multirootor kopterit, millel oli küljes Olympus PEN E-P2 kompaktkamera (joonis 2.16).



Joonis 2.16. UAS MD4-1000 multirootor kopter [Allikas: Grenzdörffer, Naumann jt, 2015]

Suurem osa hoonest mõõdistati etteplaneeritud lennumarsruudiga, kus kaamera oli otse alla suunatud (90°). Lisalendamine tehti manuaalselt ümber torni, erinevatel kõrgustel, kasutades 30° kaamera nurka (vt joonis 2.17).



Joonis 2.17. Lennuplaan vasakul ja fotogramm-meetiline plokk pildistamiste asukohtadega paremal [Allikas: Grenzdörffer, Naumann jt, 2015]

Referentspinnaks valiti terrestrialse laserskaneerimise punktipilv. Punktipilvede võrdlemiseks kasutati *CloudCompare* vabavara programmi. Pilvedest ilmnnes, et väiksemad detailid on paremini kujutatud terrestriisel laserskaneerimisel ja aerofotogramm-meetrilisel mõõdistusel on detailid rohkem silutud. Töös võrreldi omavahel ka mõningaid selgesti defineeritavaid pindu nagu näiteks seinad ja katuse servad. Testpindade standardhälbed varieerusid 0,025 - 0,088 m.

Tööst ilmnes, et aerofotogramm-meetria meetodit kasutades oli hoone alumise osa andmestik puudulik. Terrestriline laserskanner suutis hoone alumise osa skaneerida detailselt, kuid hoone ülemine osa jäi puudulikuks. Sellest järeldati, et parima tulemuse saab kui kombineerida omavahel kokku mõlema meetodi punktipilved. Sel viisil kaks erinevat punktipilve täiustavad üksteist ja lahendavad probleemid, mis oleks tekkinud ainult ühte meetodit kasutades.

Tööst selgus, et keerulisi pindu, nagu oli katedraalil, ei saa UAV-ga efektiivselt mõõta. Mudelis ja punktipilves on keerulised kohad töötlemisel silutud ja sellistes kohtades on vead paarist sentimeetrist kuni kümnete sentimeetriteni. Mudeli saaks täpsemaks kui kasutada paremat kaamerat, millel on suurema resolutsiooniga pildid.

2.4.1. Fotode ülekattuvus

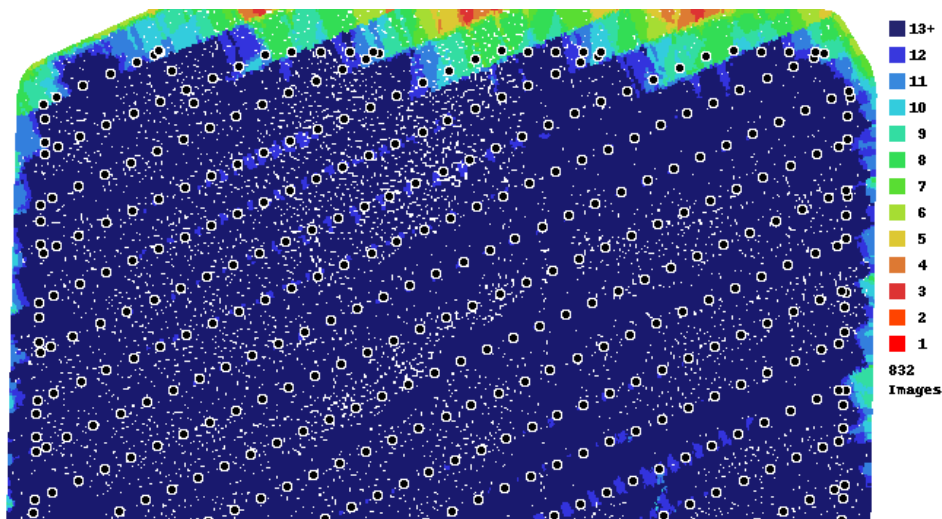
Täpse tulemuse saavutamiseks fotogramm-meetrilisel mõõdistamisel tuleb õiged valikud teha juba protsessi esimeses etapis – lennu planeerimisel. Suurem piltide ülekattuvus tähendab rohkem pilte, mistõttu on ka töötlemisprotsess pikem. Minimaalseks ülekattuvuseks loetakse 65%. Keerukama objekti puhul soovitatakse ülekattuvuse protsenti tõsta isegi 80%-ni (Flight preparation...).

(Bosak, 2017) raamatus toetutakse kogemustele, kus:

- **40%** ülekattuvus on sobilik ainult erandjuhtudel kui mõõdistatav ala on tasane. Väljaulatuvad objektid nagu majad oleksid liigselt moonutatud. Sellist ülekattuvust on sobilik kasutada parimal juhul ainult põllumajanduses. Väikese ülekattuvuse ja monotoonsete mustrite koosmõjul on oht valesobitamisele.
- **60%** ülekattuvus on sobilik metsanduses ja maapiirkondades. Sellest ülekattuvusest piisab kui eesmärgiks on 3D-mudeli alusel mahtusid arvutada.
- **70–80%** ülekattuvust peaks eelistama hoonestatud aladel, mägisematel aladel ning olukorras, kus mudelist tahetakse kätte saada midagi spetsiifilist.

Mõningates järeltöötlus programmides on võimalik näha ka ülekattuvuse raportit. Ülekattuvuse raport näitab kasutajale mitme pidi peal mingit konkreetset kohta või objekti näha on (vt joonis 2.18).

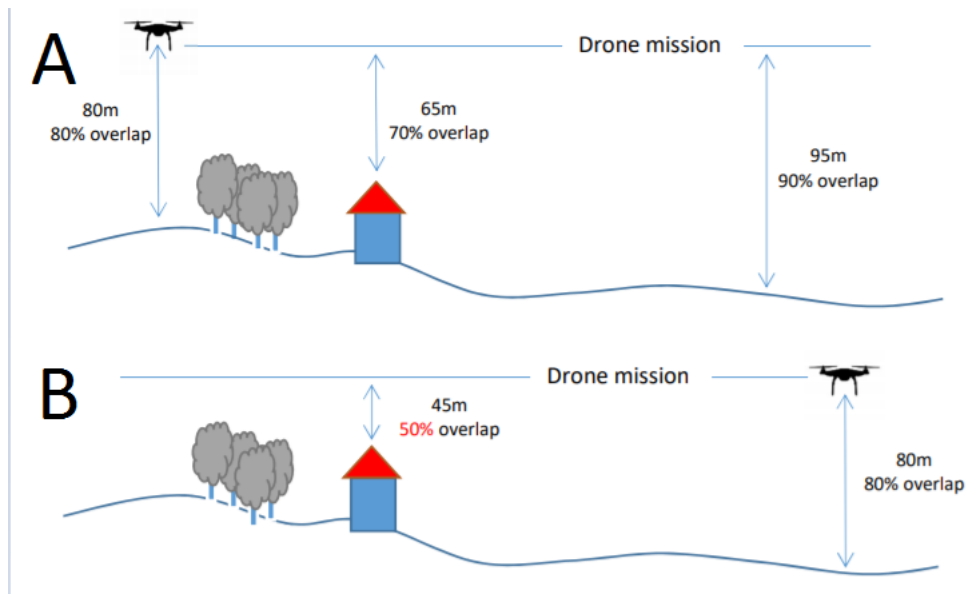
Mida rohkematel pildidel on ühesugused vaated, seda parem on töötamise lõpptulemus. Joonisel 2.18 parempoolsel skaalal oleva 1- 5 pildil oleva sama vaatega ei saa 3D mudelit teha (Overlap reports, 2018). 6- 8 pildil oleva sama vaate põhjal on võimalik koostada 3D mudel lihtsamatest objektidest nagu põllud või kuhilad. Kui ühesugused vaated on rohkemal kui 9-l pildil, siis on see piisav, et teha keerulisemaid 3D mudeleid, kus on näiteks hooned või taimestik.



Joonis 2.18. Ülekattuvuse raport [Allikas: Overlap reports, 2018]

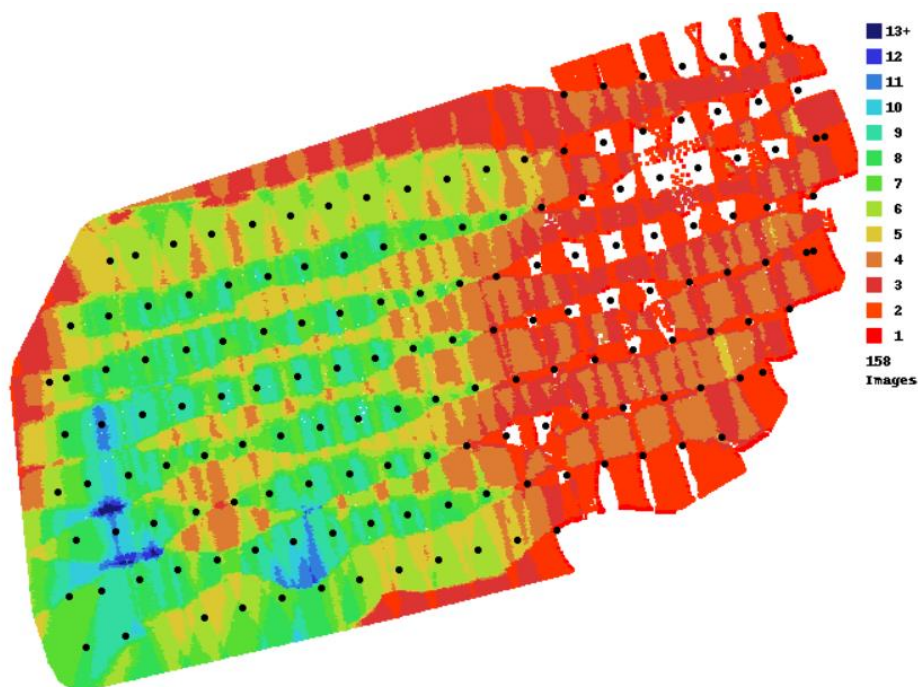
2.4.2. Lennu kõrgus ja kaamera nurk

Et säilitada kogu mõõdistatava objekti ulatuses piisav ülekattuvus, on soovitatav alustada UAV lendu maapinna kõrgemast kohast. Levinumad UAV-d ei reguleeri oma kõrgust sõltuvalt maapinna muutustest. Sellest tulenevalt peaks vältima UAV lennu alustamist madalamast kohast. Tulemuseks võib kõrgemates kohtades ülekattumine olla liiga väike (vt joonis 2.19).



Joonis 2.19. UAV lennu õige alustamine (A) ja vale alustamine (B) [Allikas: Flight preparation...]

Olukorda iseloomustab (Overlap Reports, 2016) pilt, kus kujutatud ala parem külg oli umbes 15 m kõrgem kui vasak külg. UAV lendas 40 m kõrgusel stardipaigast. Lennates maapinna kõrgema osa kohal, oli maapind kaamerale liiga lähedal, ning ülekattuvus polnud enam piisav (vt joonis 2.20).



Joonis 2.20. Piltide ülekattuvuse muutus maapinna muutuse korral [Allikas: Overlap reports, 2018]

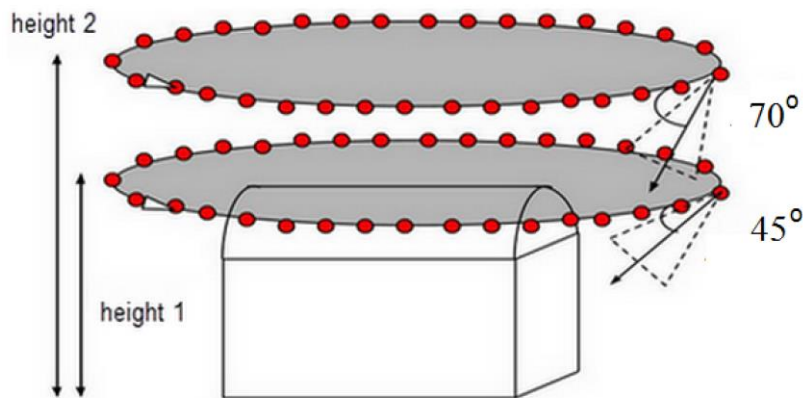
Lennu kõrgus ja kaamera nurk sõltub suuresti mõõdistatavast objektist. Kui teha 3D-mudel tasasest pinnast, näiteks maapinnamudel, on sobilik seadistada kaamera nurk nadiiri ehk otse alla. Mõõdistades objekti, kus on vertikaalsed pinnad, tuleks kaamera nurka muuta. Joonisel 2.21 on näha võrdlust, kus vasakpoolsel mudelil on pildistatud nadiiris (90°) ja parempoolsel on kaamera nurk seadistatud 45° .



Joonis 2.21. 3D-mudelite võrdlus. Vasakul nadiiris (90°) pildistatud pildid, paremal on kaamera nurk seadistatud 45° peale. [Allikas: DroneDeploy]

Kaamera nurga valikul tuleb lähtuda eelkõige objektist. Arvestada tuleb objekti kõrgust, UAV lennu kõrgust, objekti detailide ja nende asetusega. Testlennuga tuleks planeeritaval kõrgusel olles juhtpuldist kaamera nurka muuta ja nähtavust visuaalselt hinnata. Mõõdistades hoonet, millel on palju sisseulatuvaid varjualuseid, tuleks kaamera nurk seadistada selliselt, et visuaalselt oleks hoone sisseulatuvatesse osadesse näha. Kui hoone fassaad on vertikaalis enamjaolt ühtlane, siis võib kaamera nurk olla suunatud rohkem alla, nadiiri poole.

Järeltöötlustarkvara Pix4D koduleheküljel on väiksema hoone mõõdistamisel soovitatud lennata ringjooneliselt ümber hoone muutes UAV kõrgust ja kaamera nurka. Joonisel 2.22 on näidatud protsessi, kus esimese ringi ajal on kaamera nurk 45° . Seejärel on viidud UAV kõrgemale ja kaamera nurk on seadistatud 70° peale (Support.Pix4D).



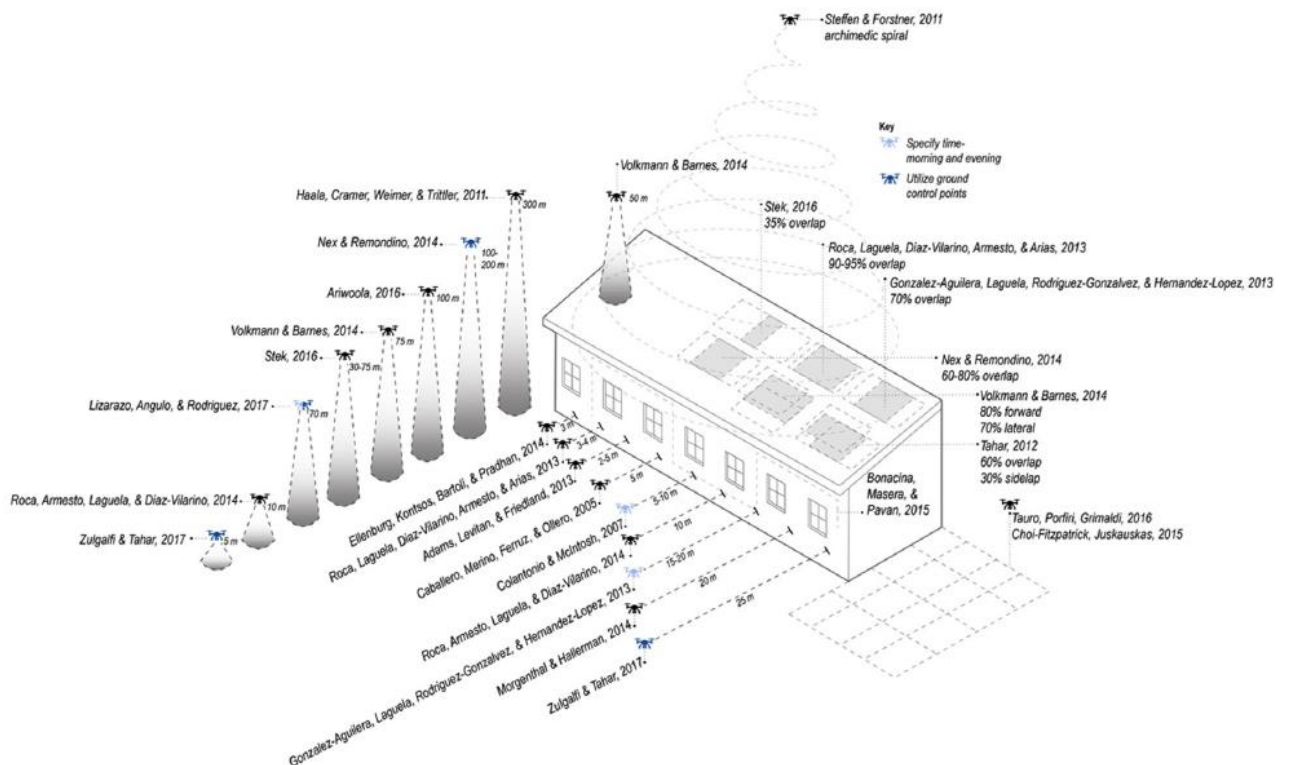
Joonis 2.22. Pildistamise plaan hoone mõõdistamisel [Allikas: Support.Pix4D]

Dronedeploy (2017) soovitas mitte mõelda sellele kui palju pilte UAV lennuga tehti. Suur hulk pilte ei taga järeltöötlusel alati seda, et mudel on hea. Hea ja täpse mudeli saab kui teha õigeid pilte õigetel kõrgustel. Toetudes kogemustele, tehakse ühe korruselise maja puhul kaks ringjoonelist lendu, erinevatel kõrgustel ja erinevate kaamera nurkadega. Kahe korruselise maja puhul tehakse kolm, 3-korruselise puhul viiel kõrgusel lend.

Kõige paremini sobivad lennukõrgused ja kaamera nurgad erinevate projektide jaoks tuleb ajapikku kogemustega. Dronedeploy (2017) soovitab alustajal lennata lisaks nadiiri piltidele veel kaks orbiiti:

- Orbiit 1 - 45° samal kõrgusel nagu nadiiris pildistatud lend
- Orbiit 2 - 30° pool eelmise lennu kõrgusest

Lennu kõrguse osas pole kindlaid standardeid välja kujunenud. Joonisele 2.23 on koondatud erinevate uurimuste lennukõrgused, ülekattuvused ja distantsid mõõdistatavast objektist.



Joonis 2.23. Erinevates uurimustes kasutatud lennuparameetrid [Allikas: Rakha & Gorodetsky, 2018]

Jooniselt on näha, et lennu kõrgus varieerub 5–300 m vahel. Välja on toodud ka UAV kaugus fassaadist, mis on erinevate uurimuste puhul 3–25 m. Toetudes varasemalt kirjanduses kasutatud parameetritele, oleks optimaalne lennukõrgus autori uuritaval objektil umbes 50 m ning kaamera nurk 70°. Kaamera nurga valiku puhul on võimalik testlennul visuaalselt hinnata, kas fassaad ja katus jäävad mõlemad pildile selgesti nähtavalt. Erinevatele uurimustele toetudes pole välja selgitatud parimaid kaamera nurga ja masina lennukõrguse parameetreid. Suuresti sõltub lennu seadistamine mõõdistatavast objektist ning objektide nähtavust tuleks hinnata ka visuaalselt.

2.4.3. Markeerimispunktide kasutamine

Markeerimispunkt on füüsiliselt objektile pandud või kindlate koordinaatidega maha joonistatud punkt. Markeerimispunkte (GCP) kasutatakse UAV piltide omavahelises georefereerimise protsessis. Minimaalseks peetakse kolme GCP punkti, kuid nende arvu suurendamine aitab kaasa parema täpsuse saavutamisele punktipilvel, 3D-mudelil või ortomosaigil (Oniga, Beraban, & Statescu, 2018). Enamlevinud võtted markeerimispunkti

märkimiseks on objektile spetsiaalse PVC märgise kasutamine või aerosoolvärviga märgistamine (vt joonis 4.2).

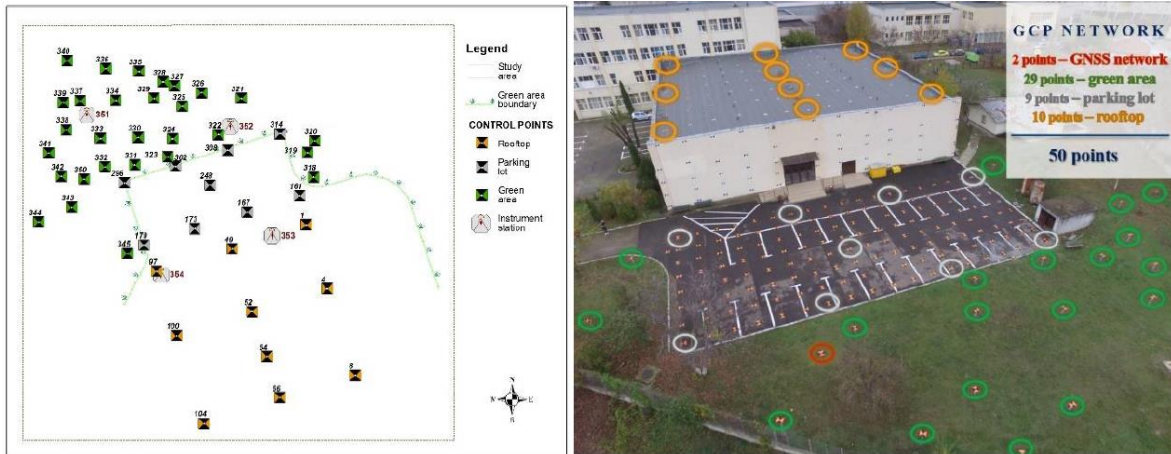
Odavamate UAV-de (DJI Phantom, Mavic ja Air mudelid) sisse on integreeritud GNSS vastuvõtja, mille täpsuseks on paar meetrit. See tähendab seda, et kui eesmärgiks on saada võimalikult täpne mudel, siis on ka odavate GNSS-iga varustatud UAV-de korral vaja kasutada markeerimispunktide, et suurendada mõõtmiste täpsust.

Arenevas UAV fotogramm-meetria valdkonnas üritatakse mõõdistamist järjest lihtsamaks teha. 2018. aasta teises pooles tuli DJI välja Phantom 4 RTK drooniga. Eelis seisneb selles, et Phantom 4 RTK suudab operaatorile edastada positsioneerimisandmeid sentimeetri täpsusega erinevalt tavalisest GNSS seadmetest droonidel, mis edastavad kuni 5 m täpsusega andmeid. Sellest tulenevalt kaob markeerimispunktide kasutamise vajadus. Teise innovaatilise ideena on Austraalia tehnoloogiaettevõtte Propeller Aero välja töötanud nutikad markeermisplaadid (vt. joonis 2.24). Neid plaate kasutades kaob vajadus GNSS seadmega markeerimispunkte mõõta. Markeerimisplaadil on sees GNSS vastuvõtja, mis maha asetades hakkab koguma enda positsioneerimisandmeid. Kuni paari sentimeetri täpsusega andmed laetakse automaatselt pilveteenusesse, kust operaator need hiljem kätte saab.



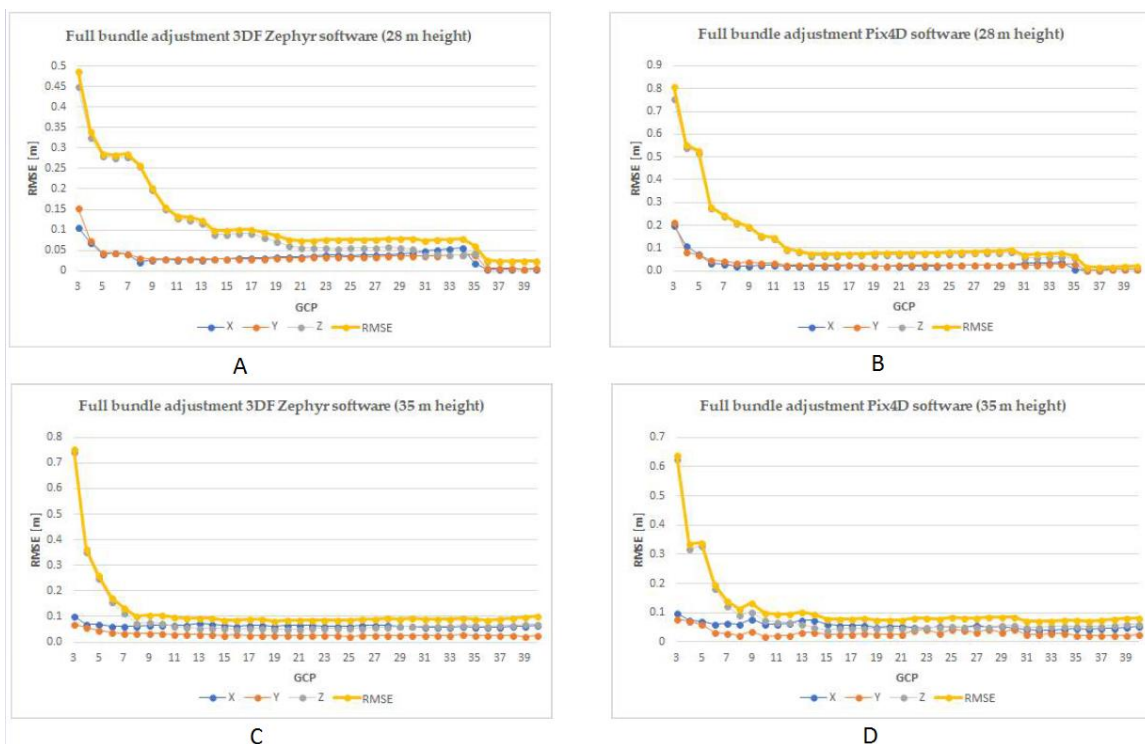
Joonis 2.24. AeroPoint markeerimisplaat [Allikas: sUAV News]

Optimaalse markeerimispunktide arvu väljaselgitamiseks on tehtud erinevaid katseid. Näiteks Oniga, Beraban, & Statescu (2018) tegid katse, kus kõrgtäpse tulemuse saavutamiseks paigaldati 1 ha alale 50 markeerimispunkti, mis mõõdistati elektrontahhümeetriga (vt. joonis 2.25).



Joonis 2.25. Uuritav ala tähistatud markeerimispunktidega [Allikas: Oniga, Beraban, & Stasescu, 2018]

Fotogramm-meetiline mõõdistamine tehti DJI Phantom 3 Standard UAV-ga kahel kõrgusel: 28 m ja 35 m maapinnast. Lend planeeriti Pix4D tarkvaraga. Ülekattuvused seadistati 80% horisontaalselt ja 40% vertikaalselt. Andmeid töödeldi *3DF Zephyr* ja *Pix4D* tarkvaradega. Järk-järgult markeerimispunktide arvu suurendades tehti mitmeid punktipilvi, mida võrreldi tahhümeetrilise mõõtmise andmetega (Oniga, Beraban, & Stasescu, 2018). Joonisel 2.26 on esitatud tulemused, mis näitavad mudelite keskmise ruutvea (RMSE) ja markeerimispunktide (GCP) suhet.



Joonis 2.26. Keskmised ruutvead erineva arvu markeerimispunktide puhul. A ja C on

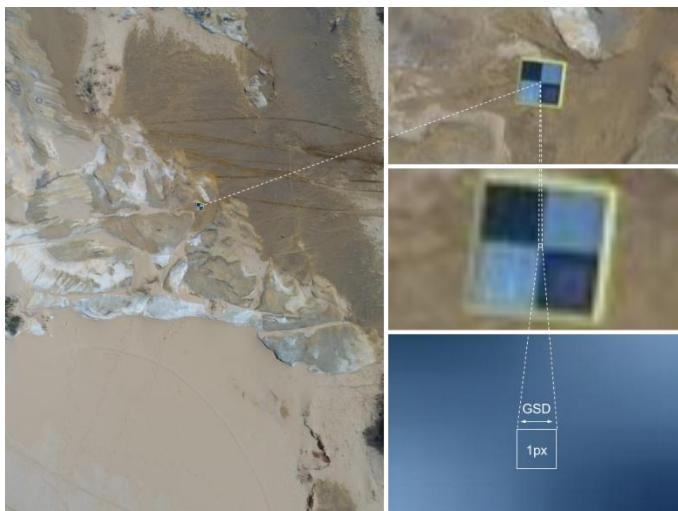
töödeldud *3DF Zephyr* tarkvaraga ja vastavalt lennukõrgused 28 m ning 35 m. B ja D on töödeldud *Pix4D* tarkvaraga ja vastavalt lennukõrgused 28 m ning 35 m [Allikas: Oniga, Beraban, & Statescu, 2018]

Jooniselt on näha, et kui 28 m lennukõrguselt soovitakse saavutada vähemalt 2 cm mudeli täpsust, tuleb kasutada umbes 40 markeerimispunkti. Kõrgema lennu puhul erinesid X, Y ja Z vead omavahel rohkem ning 40 markeerimispunkti puhul saadi umbes 8 cm keskmine ruutviga. Tulemusena toodi uurimuses välja, et hea täpsuse saavutamiseks tuleks kasutada markeerimispunkte objektile tihedusega 1 punkt 200 m² kohta (Oniga, Beraban, & Statescu, 2018).

2.4.4. UAV mõõdistamise täpsus

Tellijal on huvitatud kvaliteetsest ja täpsest mudelist. Taskukohased UAV mudelid on ka algajatele lihtsasti kättesaadavad ja tööprotsessi õigesti läbi viies on võimalik ka odavamate lennumasinatega kõrgtäpseid mudeleid koostada. Et teha head mudelit, tuleb osata defineerida täpsust, sellega seonduvaid parameetreid ja mõista, mis mudeli täpsust mõjutavad.

Tähtis parameeter, mida mõõdistamisel teadma peaks on projekti ruumiline resolutsioon, mis fotogramm-meetrias on kasutusel terminina GSD (*Ground sampling distance*). GSD on 1 piksli väärtus sentimeetrites maapinnal (vt joonis 2.27).



Joonis 2.27. GSD (*Ground sampling distance*), ehk ühe piksli suurus sentimeetrites maapinnal [Allikas: Propelleraero, 2018]

GSD sõltub peamiselt kaamera võimekusest ehk pildi resolutsioonist. Enamasti on võimalik 1 cm GSD saavutada odavamate DJI UAV-dega 30 m kõrgusel. GSD väärtus ei tähenda aga seda, et renderdatav mudel sama täpne tuleb.

Täpsust defineeritakse kahel viisil: relatiivne ja absoluutne. Relatiivne täpsus näitab, kuidas objektid omavahel mudelis paiknevad. Näiteks võib tuua hoone mudelis mõõdetava akna ava, mis on 2 m lai. Kui mudelis mõõdetud väärtus ühtib tegeliku mõõduga, võib öelda, et mudel on relatiivselt täpne. Absoluutne täpsus kirjeldab seda kui täpselt võrreldes tegeliku maailmaga see mudelis mõõdetud 2 meetrine akna ava paikneb.

Buczkowski (2017) artiklis on relatiivse ja absoluutse täpsuse kohta öeldud, et koostataval mudelil võib eeldada viga mis on 1-3-kordne GSD väärtusega. Teisisõnu 2 cm GSD puhul võib mudeli korrektse koostamise puhul täpsus olla umbes 2-6 cm. Meeles tuleb pidada seda, et see kehtib siledade pindade puhul. Keerulisemate detailidega fassaadil on vead suuremad. Absoluutse täpsuse puhul mängib rolli ka markeerimispunktide mõõdistamise täpsus ja nende defineerimine järeltöötlus programmis.

3. KASUTATUD RIIST- JA TARKVARA

3.1. Töös kasutatud instrumendid

UAV DJI Matrice M200

Käesolevas töös on aerofotode tegemiseks kasutatud multirootor UAV-d. Ehituselt on see nelja rootoriga ja korpuses on kasutatud võimalikult kergeid ning vastupidavaid materjale. Kere küljes on emaplaat, erinevad andurid, akud ning kaamera. Komplekti kuulub ka juhtpult, mille abil operaator saab UAV-d juhtida. Juhtpuldil on tavaliselt ka otsepildi edastamise võimalus. Tihtipeale kasutatakse juhtpulti ainult tööd alustades ja lõpetades, mis tähendab, et enamasti on tööd eel-planeeritavad ning operaator töö ajal drooni ei juhi. Kandevõimsuse järgi liigitades kuuluks kasutatud UAV kuni 5 kg klassi.

DJI Matrice M200 seeria UAV (vt. joonis 3.1) on mõeldud professionaalsetele kasutajatele erinevate ülesannete teostamiseks õhust, näiteks objektide inspekteerimine ja andmete kogumine. UAV on disainitud nii, et selle kere saab lihtsalt ja kiiresti lahti ja kokku monteerida, mis omakorda võimaldab selle kasutajal kiiremini erinevate objektide vahel liikuda.



Joonis 3.1. UAV DJI Matrice M200.

Arvestades, et tegu on profiseadmega, on lennumasin tavakasutajale lihtsasti kättesaadav ning maksab umbes 6000 eurot. Seade on varustatud ülevalt, alt ning eest anduritega, mis aitavad kokkupõrkeid vältida. ActiveTrack ning POI lennurežiim võimaldavad jälgida ja jälitada liikuvat objekti. M200 seeria UAV-l on suured 17-tollised tiivikud, mis tagavad stabiilse lennu iga ilmastikuga. Juhtpult on ühendatav nutitelefoni või tahvelarvutiga,

millega saab kiirelt objektile tööd ette valmistada. Tabelis 3.1 on välja toodud DJI M200 UAV peamised näitajad.

Tabel 3.1. DJI M200 UAV spetsifikatsioon. (DJI)

Mõõtmed	887×880×378 mm
Kaal	4,53 kg
Rootorite arv	4
Maksimaalne lennuaeg	38 minutit
Tööraadius	7 km
Kandevõime	2 kg
Maksimaalne kiirus	82,8 km/h
Maksimaalne tõusmise kiirus	5 m/s
Pardal olev kaamera	20 MP Zenmuse X4S

UAV-l oli küljes Zenmuse X4S 20 MP eraldusvõimega kaamera (vt joonis 3.2). Kaamera kaalub 253 g. 84-kraadise vaatevälja ja 8,8 mm fookuskaugusega kaamera maksimaalne pildiresolutsioon on 5472×3648 pikslit. Maksimaalse resolutsiooniga pilte kasutati ka käesolevas töös. Kaamera on kinnitatud 3-teljelise gimballi külge. Gimbal on motoriseeritud stabilisaator, mis algoritmide abil hoiab lennu ajal kaamerat paigal.



Joonis 3.2. UAV küljes olev kaamera Zenmuse X4S 20 MP

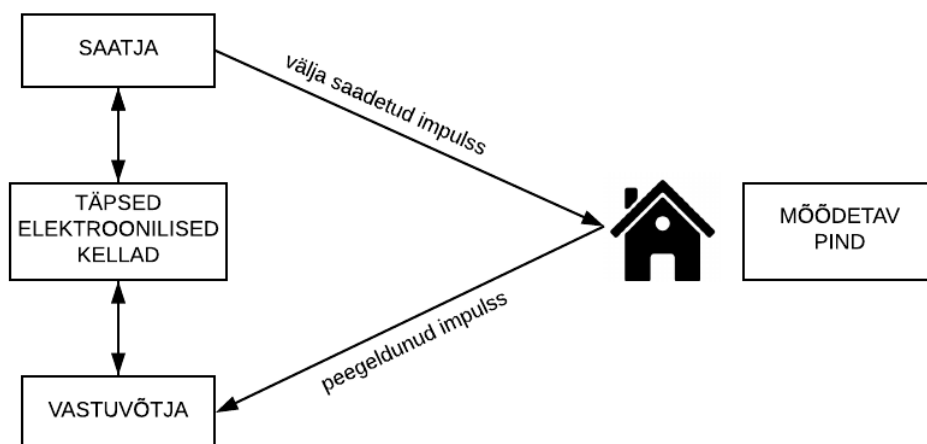
Skaneeriv elektronahhümeeter Trimble SX10

Maapealsel laserskaneerimisel kasutati Trimble SX10 skaneerivat elektronahhümeetrit (joonis 3.3).



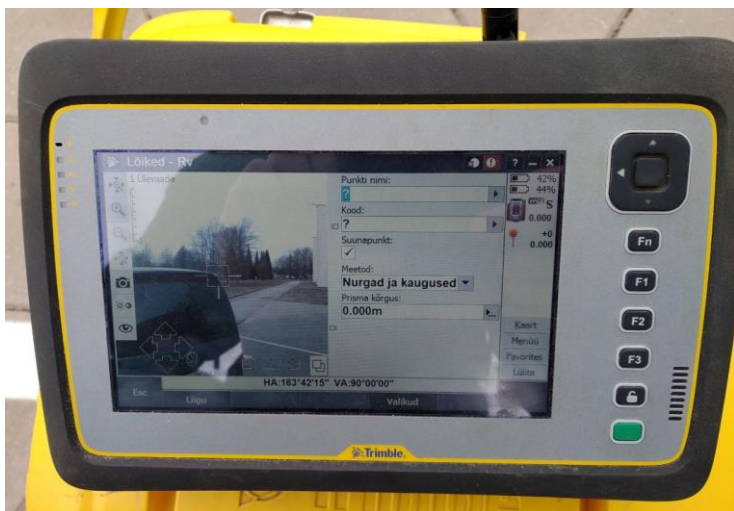
Joonis 3.3. skaneeriv elektronahhümeeter Trimble SX10.

Uudne lahendus ühendab endas geodeesia, pildistamise ning 3D-skaneerimise. Skanner toimib *time of flight* meetodil. Teisisõnu on tegu laserimpulss-skanneriga, mis mõõdab laine liikumise aega, mil laine liigub objektini ning tagasi. Kasutatakse laserimpulsse, seega pole laserkiirt visuaalselt näha. Joonisel 3.4 on näha laserimpulss-skanneri tööpõhimõtet.



Joonis 3.4. Laserimpulss-skanneri tööpõhimõte

Erinevad tehnoloogiad ühes seadmes loovad kasutajale võimaluse korraga teostada nii topomöödistust, märkimistõid või 3D skaneerimist. Skaneeriva tahhümeetriga töötamist lihtsustab suure ekraaniga Trimble Tablet Rugged PC väliarvuti (joonis 3.5). Sülearvuti võimekusega väliarvutiga on mugav jälgida projekte, või vaadata skaneeritud punktipilvi.



Joonis 3.5. Trimble Tabled Rugged PC väliarvuti

Trimble SX10-ga on võimalik masinat orienteerida sama lihtsalt nagu teisi elektrontahhümeetreid. Viseerimissilma asendab SX10-l kaamerapilt, mis kuvatakse väliarvutisse. Tulemusena on punktipilved koordinaatsüsteemis ja järeltöötlusel kaob vajadus neid ühendada. Tabelis 3.2 välja toodud peamised Trimble SX10 näitajad.

Tabel 3.2. Trimble SX10 spetsifikatsioon (Trimble)

Nurga mõõtmistäpsus	1"
Kauguse mõõtmistäpsus	Prismaga 1 mm + 1,5 ppm
	DR režiim 2 mm + 1,5 ppm
Valgusallikas	Impulsslaser 1550 nm
Skaneerimise maksimaalne distants	600 m
Skaneerimise kiirus	26 600 p/sek
Punktide tihedus skaneerimisel 50 m distantsil	Tihe skaneerimine: 6,25 mm punktide vahe, Standardne skaneerimine: 12,5 mm punktide vahe, Hõre skaneerimine: 25 mm või 50 mm punktide vahe.

RTK GNSS Trimble R4

Punktipilve koordinaatsüsteemi viimiseks oli paigaldatud uuritavale objektile markeerimispunktid. Need tuli mõõta RTK GNSS seadmega. Mõõdistamiseks kasutati Trimble R4 GNSS seadet ning Trimble TSC2 väliarvutit (vt. joonis 3.6).

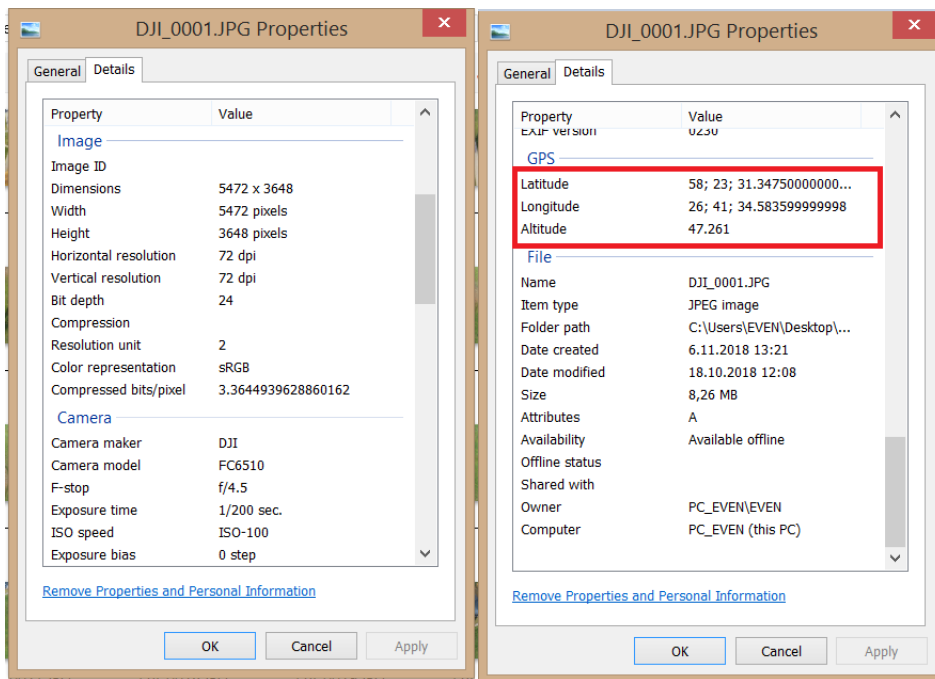
Trimble R4 GNSS seadme reaallajas RTK mõõtmiste täpsused on horisontaalne 8 mm + 1 ppm RMS ning vertikaalselt 15 mm + 1 ppm RMS (Datasheet - Trimble R4 GNSS, 2015).



Joonis 3.6. Trimble R4 GNSS seade paremal ja TSC2 väliarvuti vasakul

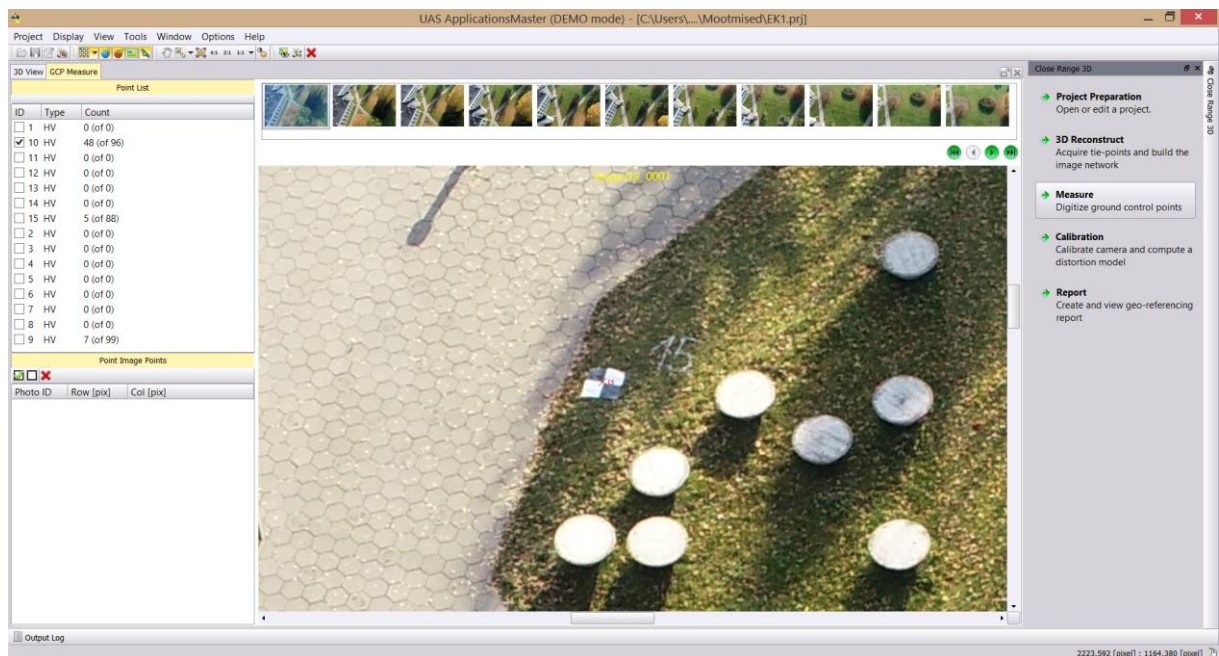
3.2. Töös kasutatud järeltöötlustarkvara

Aerofotode järeltöötluseks kasutati tarkvara *UAS Master*, mis on 2013. aastal loodud *Trimble Business Centeri* lisaprogramm. Sellega on võimalik töödelda nii lähedalt kui ka kaugemalt pildistatud objekte. Uuenduste käigus on programmi kasutamine tehtud kasutajale võimalikult lihtsaks. Paljud protsessid on automaatsed. Programm pakub automaatset georefereerimist, kalibreerimist ning raportite koostamist. Projekti seadistades loetakse piltide EXIF andmetest automaatselt piltide vajalikud parameetrid ning lisatakse need projekti sätetesse. EXIF-iks nimetatakse piltide metaandmeid, mida saab iga kasutaja lihtsalt vaadata. EXIF sisaldab endas erinevaid kaamera parameetrid, aja- ja asukoha informatsiooni ning suurel hulgal muid andmeid. Sisuliselt on tegu samade andmetega, mida on võimalik näha vajutades arvutis pildil parema hiireklikiga ja valides *properties* (joonis 3.7).



Joonis 3.7. Piltide metaandmed

UAS Master toetab erinevaid tiib-tüüpi või multirootoritega mehitamata õhusõidukite andmeid. Samuti pole lisatud piiranguid kaameratele. Lihtsa kasutajaliidese ning automatiseeritud protsesside kombinatsiooni abiga saab mudelite loomisega hakkama ka selles valdkonnas algaja inimene. Joonisel 3.8 on näha *UAS Masteri* kasutajaliidest.



Joonis 3.8. *UAS Master* kasutajaliidese georefereerimise etapis

4. METOODIKA

Andmete kogumine eeldab hästi läbimõeldud ettevalmistust. Valida tuleb sobilikud mõõdistusinstrumendid ja abivahendid. Tutvuda tuleb ka uuritava objektiga, et selle iseärasustest lähtuvalt planeerida mõõdistamisprotsess. Geodeetiliste mõõtmiste puhul mängivad rolli ka ilmastikutingimused, mistõttu tuleks valida mõõdistamiseks vaikne ja heade valgustingimustega päev.

4.1. Mõõdistatav objekt

Mõõdistatavaks objektiks valiti Eesti Maaülikooli (joonis 4.1) Kreutzwaldi 5 õppehoone ehk Metsamaja. Hoone on suur (netopind ligikaudu 20 000 m²) ja selle väline kuju on hästi mitmetahuline. Hoone arhitekt on Valve Pormeister ja maja valmis 1984. aastal (Eesti Maaülikooli..., 2008).



Joonis 4.1. Eesti Maaülikooli Kreutzwaldi 5 õppehoone. Pildistatud DJI M200 pardalt 18.10.2018.

Kreutzwaldi 5 hoone koosneb kahest tiivast, millest Kreutzwaldi tänava poolne on kokku volditud ümber sisehoovide. Selline disain iseloomustab Pormeistri äratuntavat käekirja.

Sisehoovide funktsionaalsuseks on ruumidesse lasta loomulikku valgust. Jõepoolsest tiivast avanevad vaated dendropargile. Jõepoolse hoone otsas domineerib konsoolne auditoorium, mis paistab silma seest järsult tõusva põrandaga. Välisviimistlusel on kasutatud dolomiitplaate (Eesti Maaülikooli..., 2008).

4.2. Välitööde kirjeldus

4.2.1 Hoone pildistamine UAV-ga

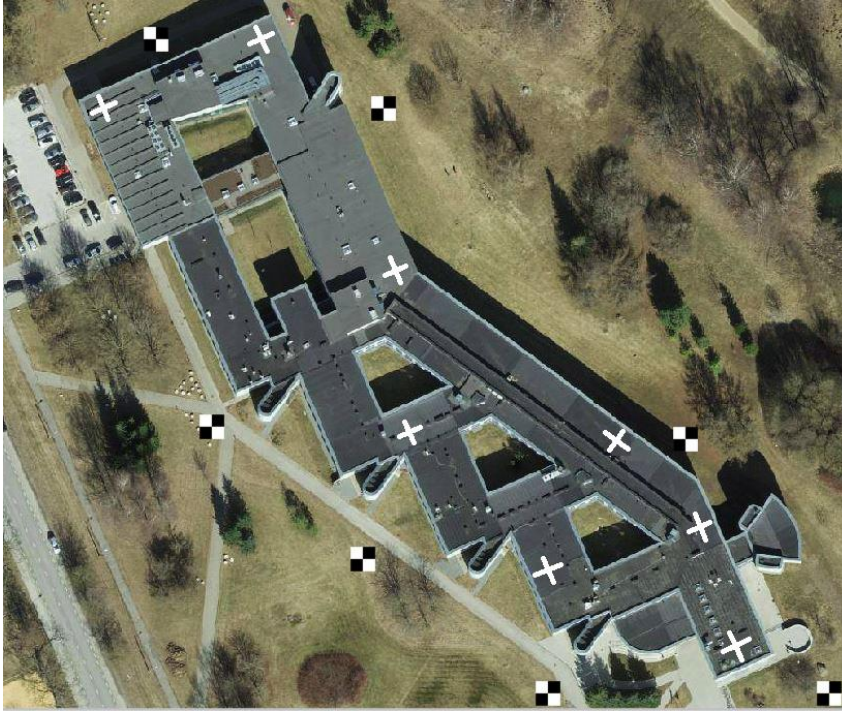
Lend mehitamata õhusõidukiga toimus 18. oktoobril 2018 Eesti Maaülikooli Metsamaja juures koostöös Geosofti esindaja Marek Viitkiniga. Mõõdistamise päeval oli päikeseline ilm ja sooja 12 kraadi. Instrumentidena kasutati DJI M200 UAV-d, Trimble R8 GNSS seadet ning Trimble TSC2 väliarvutit.

Enne mõõdistamist paigaldati Metsamaja ümbrusesse ning hoone katusele markerpunktid. Markerpunktid on vajalikud selleks, et andmetöötlusel nende abil punktivilv koordinaatsüsteemi seada. Katusele markeeriti ristid valge aerosoolvärviga ja maapinnale paigaldati spetsiaalsed PVC materjalist tähised (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Markeeringupunkt Metsamaja katusel ja PVC materjalist markeerimispunkt maapinnal.

Kokku oli markeerimispunkte mõõdistataval objektil 15, millest 8 asusid Metsamaja katusel ja 7 punkti võrdselt ümber hoone paigutatuna maapinnal (joonis 4.3). Markeerimispunktid koordineeriti RTK GNSS seadmega Trimble R4. Tähiste koordinaatfaili on tarvis hilisemal andmetöötlusel piltide orienteerimiseks.



Joonis 4.3. Markeerimispunktid uuritaval objektil. 8 punkti asusid Metsamaja katusel ja 7 punkti võrdselt ümber hoone paigutatuna maapinnal.

DJI M200 lennu planeerimine toimus Apple iPad tahvelarvutis, mis ühildub UAV juhtimispuldiga. Kasutati DJI enda arendatud *FlightPlanneri* tarkvara. Tarkvaras määrati mõõdistatava objekti ala, lennu kõrgus, kiirus, ja kaamera nurk. Lennul kasutatud parameetrid on näha tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Töös kasutatud lennuparameetrid

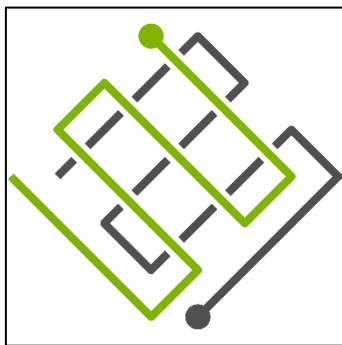
Lennu kõrgus	50 m
Lennu kiirus	5 m/s
GSD	1,48 cm/px
Kaamera nurk	70°
Lennusuunaline ülekattuvus	80%
Külgmiline ülekattuvus	80%
Piltide arv	615

Eesmärgiks oli lennata sellisel kõrgel, kus kõrgemad puud ja elektriliinid ei takistaks ohutut lendamist. Teisalt tuli lennata kõrgusel, kus kaamera parameetrid võimaldaksid saada GSD väärtuse alla 2 cm/px kohta, et saada täpne mudel. Sellest tulenevalt valiti optimaalselt lennukõrguseks 50 m. Metsamaja suuruse tõttu polnud ümber hoone mõistlik ringjooneliselt lennata ja eesmärgiks oli andmeid koguda ühe lennuga. Lähtudes (Support.Pix4D) juhendis olevast soovitusel lennata kõrgema lennu puhul 70° kaamera nurgaga, kasutati ka autori töös sama parameetrit. Nurga valikul kontrolliti ka visuaalselt, et pildile jääks fassaad ja katus. Standardse 90° nurgaga poleks fassaadi näha, mistõttu mudeli tegemisel oleks lõpptulemuses visualiseeritud ainult katus ja maapind. Planeerimisprotsess võttis aega alla 5 minuti. DJI *FlightPlanner* kasutajaliidest tahvelarvutil on näha joonisel 4.4.



Joonis 4.4. DJI *FlightPlanner* kasutajaliides

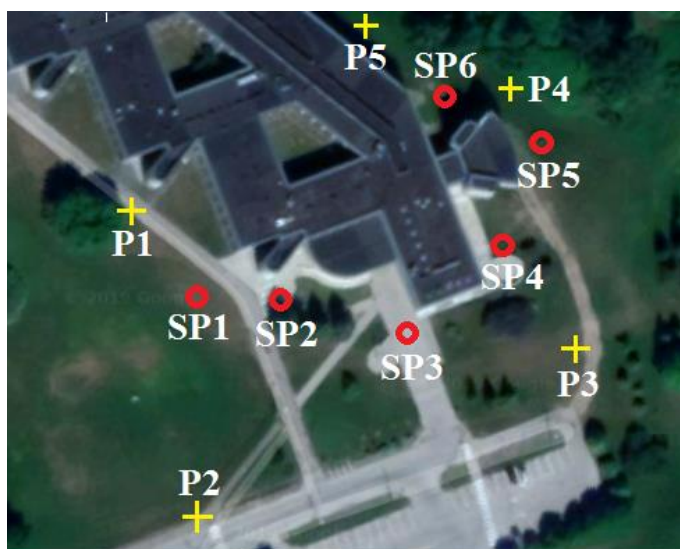
Mehitatud õhusõidukile oli ette programmeeritud automaatne õhkutõus ja maandumine. Kasutati *DoubleGrid* lennustiili (joonis 4.5), mis tähendab, et UAV lendas märgistatud ala läbi risti-rästi, et kaamera nurgast tulenevalt ei jääks maja detailid varju. Lennuprotsess võttis aega umbes 25 minutit ja 54 sekundit ning kokku tehti 615 pilti.



Joonis 4.5. *DoubleGrid* lennu põhimõte [Allikas: Double Grid Mission Settings]

4.2.2 Joone laserskaneerimine Trimble SX10-ga

Laserskaneerimisel kasutati Trimble SX10 laserskannerit. Skanneri orienteerimiseks kasutati Metsamaja ümbruses olevaid kindelpunkte. Orienteerimine tagab selle, et hiljem on punktipilv õiges koordinaatsüsteemis. Metsamaja fassaad skaneeriti kuue seispunktiga (SP) ja orienteerumiseks kasutati viit kindelpunkti (P) (joonis 4.6).



Joonis 4.6. Trimble SX10 seisupunktid (SP) ja orienteerimiseks kasutatud kindelpunktid (P) fassaadi skaneerimisel

Fassaadi skaneerimine toimus 25. märtsil 2019. aastal. Skaneeritavaks alaks valiti Metsamaja A korpus. Terve maja skaneerimine on liiga ajakulukas ning selle punktipilv oleks ka arvuti jaoks liiga suure mahuga. Lisaks on hoone korpused ehituselt ühetaolised, mistõttu otsustati mõõdistamisel piirduda A korpusega.

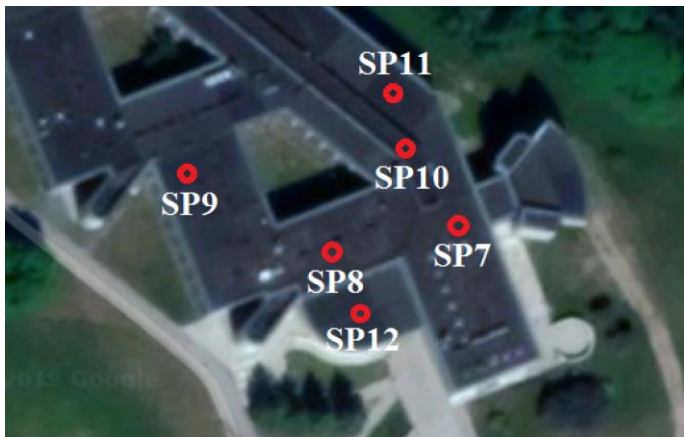
Kõik skaneerimised tehti standardse punktihedusega (vt tabel 3.2). Mõõdistamisel kasutati „*polygon*“ valikut, kus displeil määratleti vajutustega skaneeritav polügoon. Selekteeritud ala skaneerides toimus skaneerimisprotsess kiiremini, sest välja jäeti kõik muu ebavajalik ning punktipilv oli arvutis selle võrra mürast puhtam. Lisaks kasutati skaneerimisel pildistamise funktsiooni, mis annab hiljem arvutis punktidele reaalsed värvid. Keskmiselt saadi ühest seisupunktist fassaadi mõõdistades 7 mln punkti. Ajaliselt kulus fassaadi skaneerimisele 5 h.

Katuse skaneerimine toimus päev hiljem, 26.märtsil. Et katusel skaneeriv tahhümeeter koordinaatsüsteemi orienteerida, tuli Trimble SX10 esmalt maa peal püsti panna ja seejärel mõõdistati katuse servale abipunkte (joonis 4.7), kasutades täisvõttega mõõtmise meetodit.



Joonis 4.7. Metsamaja katuse serval olev abipunkt

Esialgu mõõdistati katuse servadele kaks abipunkti, et tahhümeetrit oleks võimalik katusel orienteerida. Hiljem mõõdistati abipunkte täisvõtte meetodil juurde, et erinevates seisupunktides aparaat paika saada. Katusel olles skaneeriti 6 seisupunkti (joonis 4.8).



Joonis 4.8. Trimble SX10 seisupunktid (SP) katuse skaneerimisel

Katusel skaneerimise tegi keeruliseks seal olevad erinevad väljaulatuvad objektid nagu näiteks ventilatsioonitorud, õhksoojuspumbad, väljapuhketorud, õhuvõtutorud. Lisaks oli katuse pind küllaltki astmeline (joonis 4.9).



Joonis 4.9. Katusel asetsevad tehnosüsteemid muudavad katuse skaneerimise keerukaks ja aeganõudvaks.

Katuse keerukusest tulenevalt jäi andmestik osaliselt puudulikuks. Skaneerimist raskendas ka tõrvapapi all olev soojustus, mis tegi katuse pinna kohati pehmeks. Seetõttu tuli kasutada statiivi alust, kuna statiivi jalgu ei saanud sisse suruda. Pehmel katusel oli raskusi ka masina loodi seadmisega.

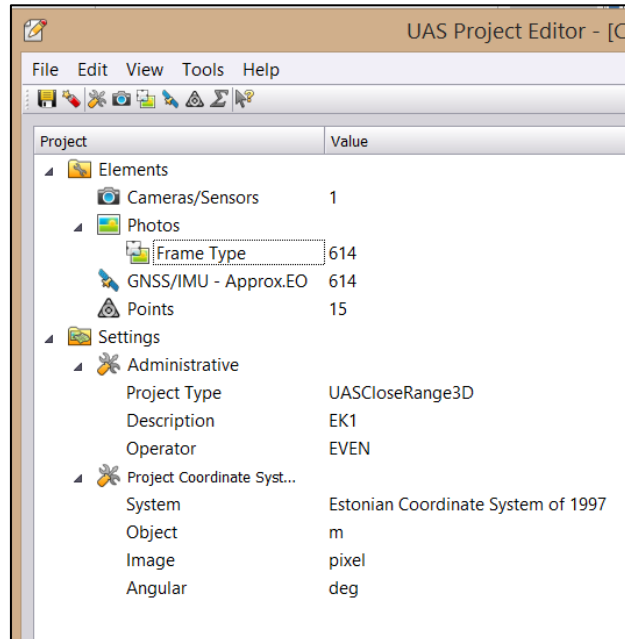
Katusel skaneerimisel kasutati sarnaselt fassaadi skaneerimisel polügooniga ala määramist ning standardse tihedusega skaneerimist. Skaneeritava polügooni määramine katusel osutus probleemiks, kuna joone tõmbamine mööda horisonti ajas väliarvuti segadusse ning tihtipeale pakkus skaneeritavaks alaks hoone asemel taevast.

Katuse skaneerimine oli tunduvalt keerukam kui fassaadi skaneerimine. Ajakulu oli umbes 6 h. Kuna polügooni määratlemine tihtipeale ei õnnestunud, tuli teha 360° skaneerimisi mis võttis mõnes seisupunktis aega isegi 30 minutit, skaneerides seisupunktis kuni 25 mln punkti.

4.3. Andmete töötlus

Aerofotogramm-meetrilisel meetodil kogutud andmeid töödeldi programmis *UAS Master 9.1*. Algajale kasutajasõbralikus programmis on võimalik punktipilve teha suhteliselt lihtsa vaevaga. Programmis tuleb läbida kolm etappi, mille tulemusena saadakse detailne punktipilv.

- Tuleb teha projekt. Projektis tuleb programmile näidata kasutatavad pildid, maapinna kontrollpunktide koordinaadid ja koordinaatsüsteem. Kaamera sensori tüüp ja GNSS/IMU andmed on olemas pildifailis EXIF formaadis ning programm kogub selle info ise automaatselt. Joonisel 4.10 on näidatud projekti ülevaate aken.



Joonis 4.10. Projekti ülevaate aken programmis UAS Master

Jooniselt on näha, et imporditud on 614 pilti, mis sisaldab endas korraga GNSS ja IMU andmeid. Lisaks on imporditud programmi 15 punkti, mis mõõdeti GNSS seadmega.

- Esialgne 3D-rekonstrueerimise etapp. Siin tehakse eelmises etapis saadud andmetest esialgne piltide võrgustik, kasutades ligikaudseid asukoha andmeid. Mudelis on näidatud ka kaamera sensori asukoht ja nurk pildi tegemise hetkel.
- Piltide orienteerimine tähiste abil ehk georefereerimine. Georefereerimise etapis tuleb programmis üle vaadata kõik pildid kus on näha markeerimispunkti. Punkti tsentrisse tuleb märkida vastav GNSS koordinaat (joonis 4.11). Tulemusena koordineeritakse pildid õigesse asendisse.
- Eelviimases protsessis toimub kaamera parameetrite abil võrgustiku kalibreerimine. Tulemusena koostatakse PDF formaadis raport, mis sisaldab endas kogu protsessi kohta täpsusinfot.
- Viimases etapis renderdatakse punktipilv. See on punktipilve protsessi kõige pikem osa, kuid inimene ei pea selle protsessi juures olema.



Joonis 4.11. Georefereerimise protsess programmis *UAS Master*

Mõlemal meetodil koostatud punktipilved avati *Trimble RealWorks* programmiga, mis on spetsiaalselt mõeldud erinevate punktipilvedega töötamiseks ja nende analüüsimiseks. Lisaks kasutati punktipilvede analüüsimiseks *CloudCompare*, mis on avatud lähtekoodiga vabana kätte saadav tarkvara. *CloudCompare* võimaldab kahte punktipilve võrrelda selliselt, et tulemus on visualiseeritud värviskaalaga.

5. MÕÕTMISTULEMUSTE ANALÜÜS

Eelnevalt kirjeldatud tööetappide läbimise tulemusena saadi kaks punktipilve: aerofotogramm-meetrilisel meetodil kogutud andmete põhjal genereeritud punktipilv ja terrestrilise laserskaneerimise meetodil mõõdistatud punktipilv. Mõlemad punktipilved avati *Trimble RealWorks* programmiga, kus neid oli mugav uurida.



Joonis 5.1. Aerofotogramm-meetrilisel meetodil (UAV) saadud punktipilv – 64,4 mln punkti

Jooniselt 5.1 on näha, et UAV-ga koguti andmed terve Metsamajast. Selles punktipilves on kokku 64,4 mln punkti.

Terrestrilise laserskanneriga koguti andmeid Metsamaja A korpusest (joonis 5.2). Joonisel on näha puhastamata punktipilve, kus on palju üleliigseid punkte. Puhastamata kujul sisaldas laserskaneeritud punktipilv 98,5 mln punkti. Suurendades punktipilvedes vaadet selliselt, et oleks näha fassaadi detailisust, ilmnes UAV punktipilve kehv tihedus. Joonisel 5.3 võrreldakse kahe punktipilve tihedust.



Joonis 5.2. Terrestrilise laserskaneerimise (TLS) meetodil saadud punktipilv Metsamaja A korpusest – 98,5 mln punkti



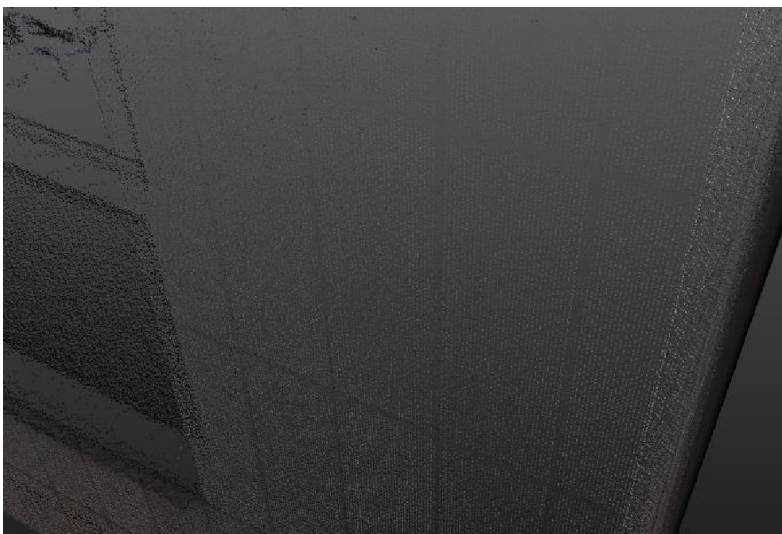
Joonis 5.3. Aerofotogramm-meetria (UAV) ja terrestrilise laserskaneerimise (TLS) punktipilvede tihedus

Jooniselt 5.3 on näha, et terrestrilise laserskanneriga mõõdistatud fassaad on väga detailne ja tihe. Aerofotogramm-meetrilisel meetodil kogutud andmete põhjal tehtud punktipilv on hõre. Tuvastatavad on ainult hoone gabariidid ja akna avad. Varjulistes kohtades andmestik puudub. Joonisel 5.4 on näha aerofotogramm-meetrilisel teel teostatud punktipilve tihedus suurendatult.



Joonis 5.4. Aerofotogramm-meetria (UAV) punktipilve tihedus lähedalt vaadatuna

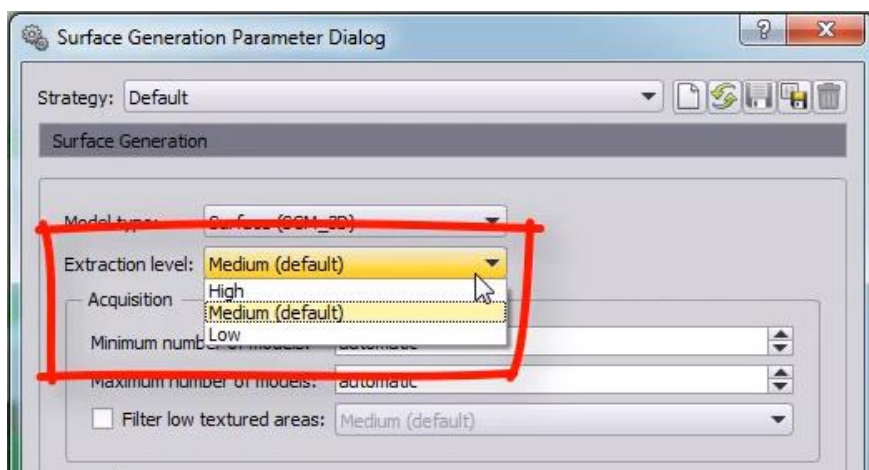
Lähemal uurimisel selgus, et maapinnal ja hoone katusel olid punktipilve punktid ühtlaselt ja korrapäraselt jaotatud ning asetsesid küllaltki tihedalt. Enamasti olid punktid maapinnal üksteisest 20 – 25 mm vahedega ning katusel 15-20 mm. UAV punktipilve fassaadi punktid paiknesid ebakorrapäraselt, tekitades punktipilves tühju kohti. Fassaadil näha olevad tühjad kohad olid kohati 20 – 40 cm läbimõõduga. Joonisel 5.5 on suurendatud terrestrilise laserskaneerimise punktipilve visualiseerimaks selle tihedust.



Joonis 5.5. Terrestrilise laserskaneerimise (TLS) tihedus lähedalt vaadatuna

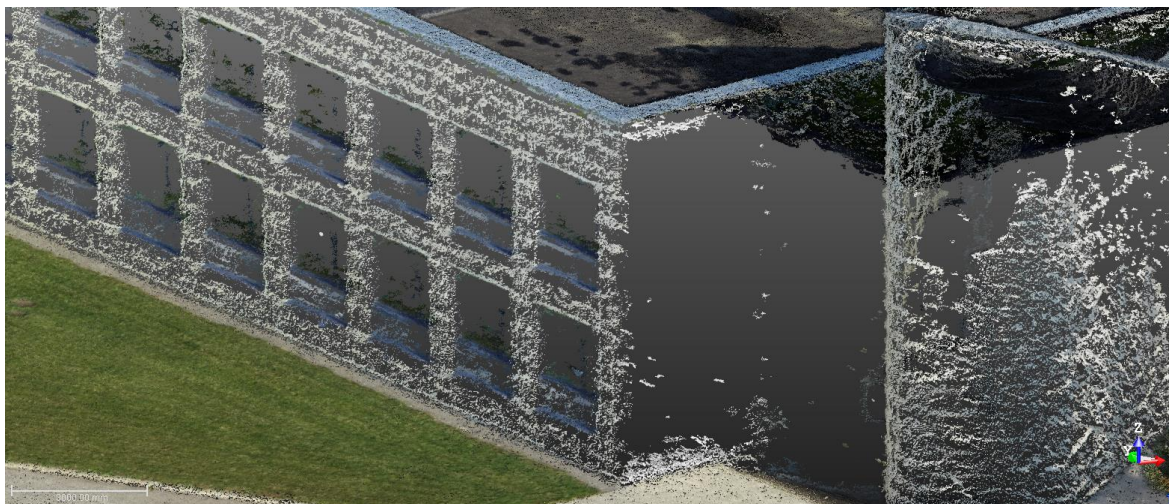
Terrestrilise laserskaneerimise fassaadil paiknesid punktid korrapäraselt ühtlaste ribadena. Punktide omavahelised kaugused olid enamasti 6 – 8 mm. Katusel paiknesid punktid ebakorrapärasemalt kui fassaadil. Punktide vahekaugused üksteisest varieerusid 4 – 10 mm.

Esialgu renderdati *UAS Master*-it kasutades punktipilv keskmise tihedusega sätetel. Parema tulemuse saamiseks renderati *UAS Master*-is punktipilv uuesti aga seekord kõrgeima tihedusega sätetel. Tihedust sai valida *UAS Master*-i viimases etapis, kus genereeriti punktipilv (joonis 5.6).



Joonis 5.6. Punktipilve genereerimisel võimalikud valikud: *High* – kõrgeim tihedus, *Medium* – keskmine tihedus ja vaikimisi valik, *Low* – madal tihedus.

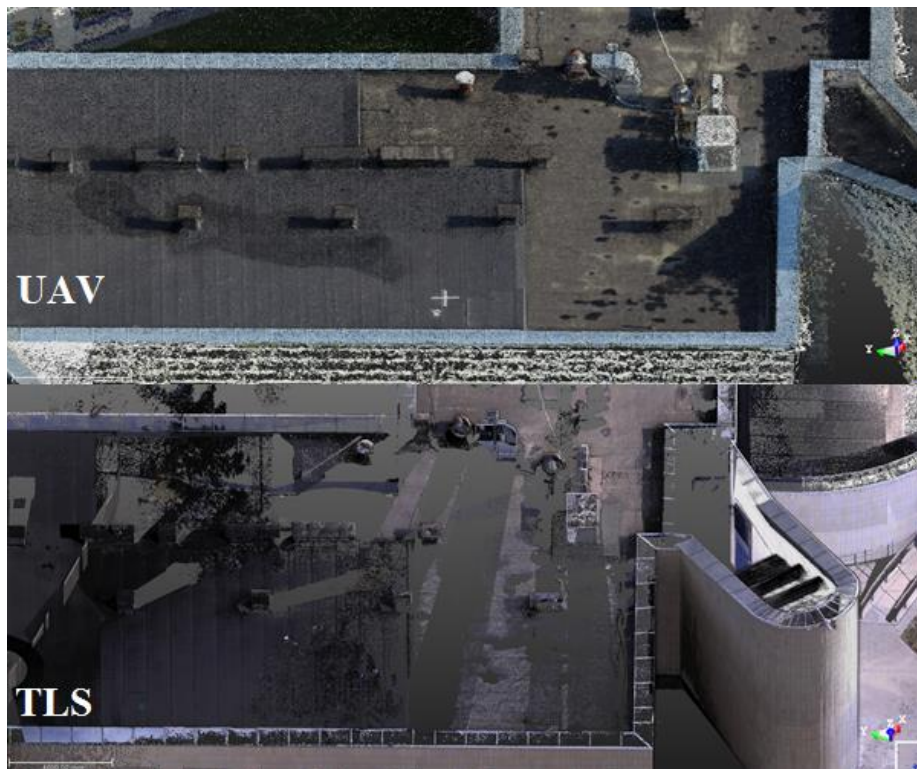
Uus UAV punktipilv sisaldas endas 97,9 mln punkti (joonis 5.7).



Joonis 5.7. Uus UAV punktipilv, mis renderdati tihedaima sättega – 97,9 mln punkti

Jooniselt 5.7 on näha, et punktipilve tihedus paranes, kuid mitte palju. Akna avad ja hoone gabariidid on täpsemini defineeritavad. Varjulised kohad pole uues mudelis paranenud.

Kui võrrelda punktipilvede katuseid siis võib öelda, et UAV punktipilve katus on detailsem võrreldes laserskaneeritud punktipilve katusega (joonis 5.8).



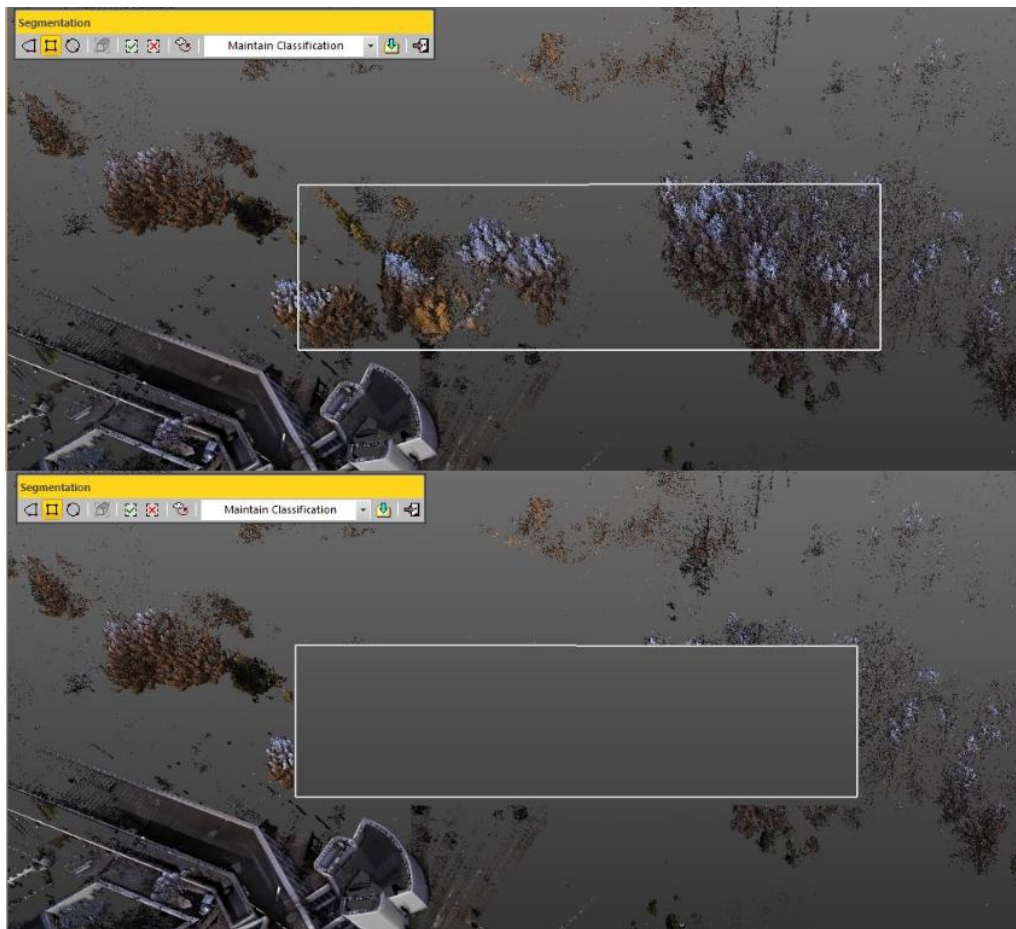
Joonis 5.8. Katusepinna võrdlus aerofotogramm-meetria (UAV) ja terrestrilise laserskaneerimise (TLS) punktipilvede vahel

Jooniselt selgub, et UAV abil teostatud punktipilve katus on detailsem kui laserskaneerimisega tehtu. Laserskaneeritud punktipilve katuse osa on jäänud lünklikuks just seal asuva suure hulga tehnosüsteemide tõttu. Autori arvates ei ole mõistlik kasutada laserskannerit katusel, kus on palju tehnosüsteeme, arvestades ajakulu ja seisupunktide planeerimist ja soov saada detailne mudel.

Fassaade võrreldes on selge, et terrestrilise laserskaneerimise meetodiga on saadud tihedam ja detailsem punktipilv kui aerofotogramm-meetrilisel meetodil. Fassaadi ja katuse tulemusi arvesse võttes võib järeldada, et aerofotogramm-meetrilisel mõõdistamisel piltidel olevad vertikaalsed pinnad on töötlemisel probleemsed kohad. See-eest horisontaalsed pinnad nagu maapind ja katus on UAV-ga mõõdistatud punktipilves piisavalt detailsed.

Järgnevalt puhastati mõlemad punktipilved üleliigsetest andmetest. Selleks kasutati *Trimble RealWorks* programmi. Programmis kasutati punktipilvede puhastamiseks „*Segmentation*“

tööriista. Tööriistaga tuli märgistada ala ning seejärel sai selekteeritud alas olevad punktid kustutada. Joonisel 5.9 on näha kuidas tööriistaga punktipilve puhastati.

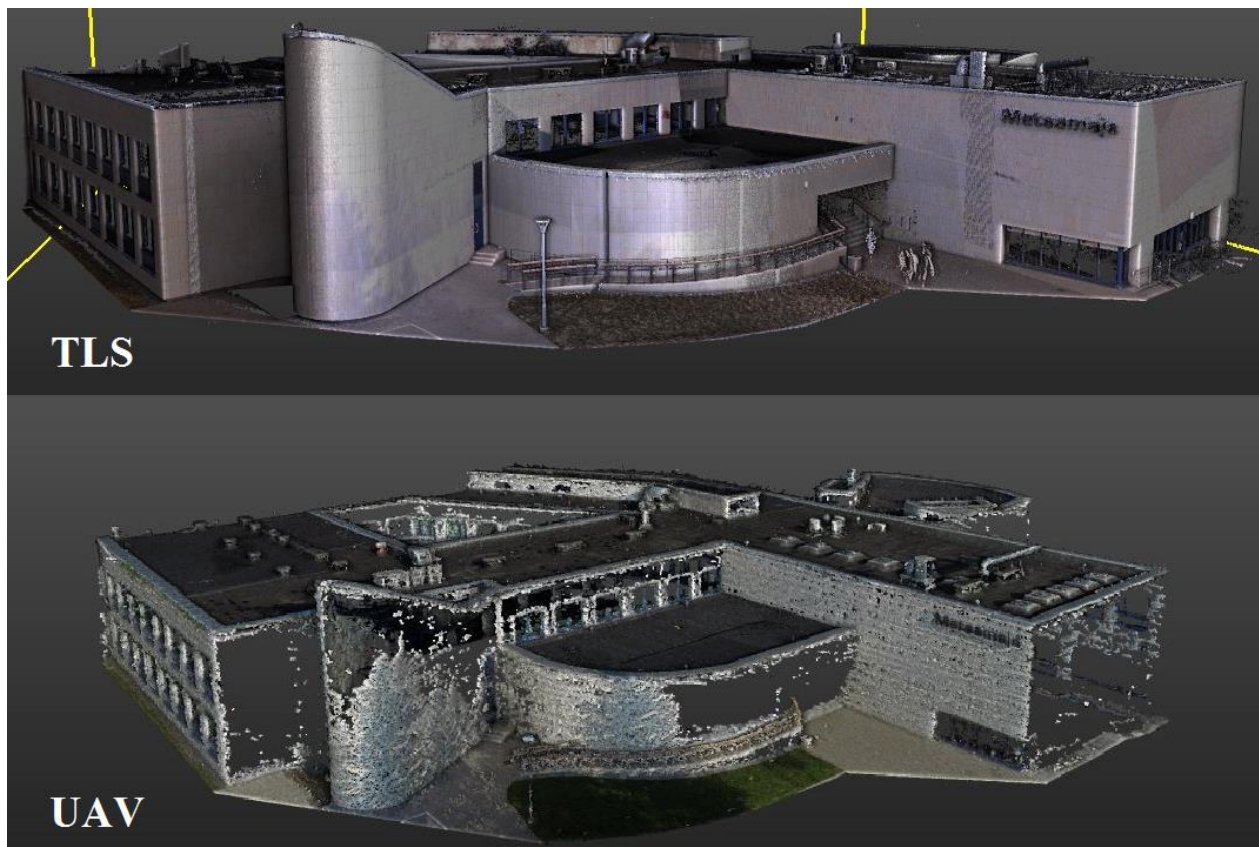


Joonis 5.9. Punktipilve puhastamine *Trimble RealWorks*-is

Peale puhastamist jäi punktide arvuks punktipilvedel:

- Terrestilise laserskaneerimise meetod – 10,4 mln punkti
- Aerofotogramm-meetriline meetod – 7,4 mln punkti

Puhastatud punktipilved on näha joonisel 5.10.



Joonis 5.10. Puhastatud terrestilise laserskaneerimise meetodil (TLS) ja aerofotogramm-meetrilisel meetodil (UAV) tehtud punktipilved

Aerofotogramm-meetriliste andmete töötlemise lõpus koostas *UAS Master* ka töötluse raporti, mis on lisatud Lisasse 1. Raportis on välja toodud üldine projekti info, kaamera kalibreerimise parameetrid ja orienteerimise tulemused.

Raportist selgub, et keskmine punktipilve punktide standardviga on:

- $X = 3,1 \text{ cm}$
- $Y = 3,3 \text{ cm}$
- $Z = 5,7 \text{ cm}$

Kontrollpunktide mõõtmiste keskmine ruutviga on:

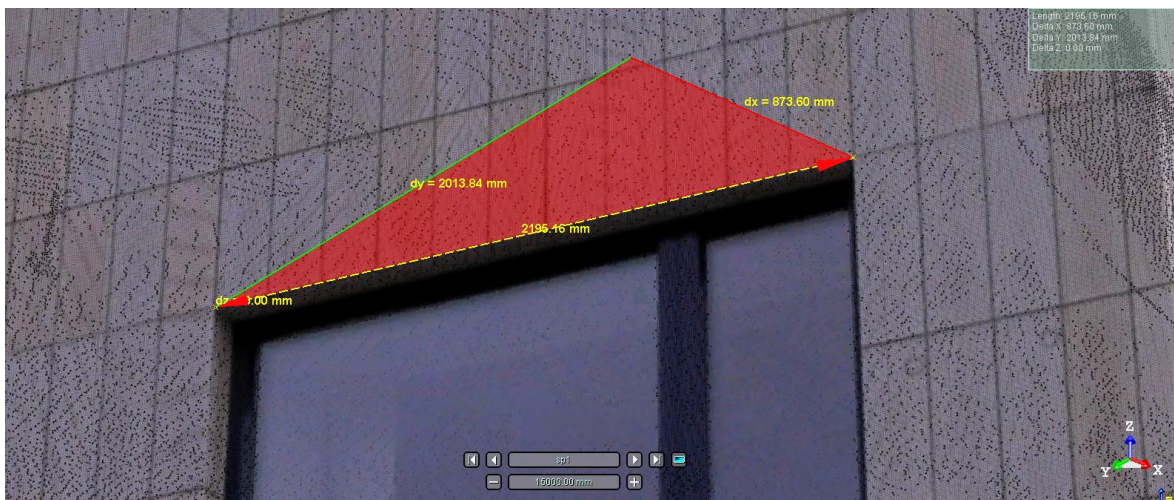
- $X = 1,6 \text{ cm}$
- $Y = 2,1 \text{ cm}$
- $Z = 3,4 \text{ cm}$

Et mõista mõlema punktipilve täpsust, uuriti neid *Trimble RealWorks* programmis. Terrestrilise laserskaneerijaga mõõdistatud andmestiku eeliseks on see, et punktipilve saab programmis vaadata „*station based mode*“-s, mis tähendab, et punktipilve on võimalik vaadata seisupunkti vaatest. Seisupunkti vaates on kuvatud väga detailne ja täpsete värvidega pilv, mida on võimalik arvutiekraanil peensusteni suurendada (joonis 5.11).



Joonis 5.11. „*Station based mode*“, vaade, kus Trimble SX10 seisis seisupunktis nr 1.

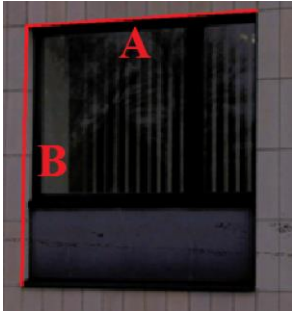
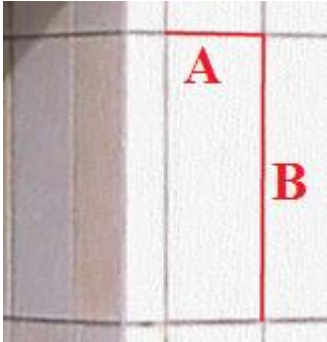

Kasutades *Trimble RealWorks* programmis „*Measure*“ tööriista, mõõdistati mõlemas punktipilves mõned lihtsasti defineeritavad pinnad. Mõõdistamiseks suurendati ekraanikuva pilti ja valiti kaks punkti (joonis 5.12).

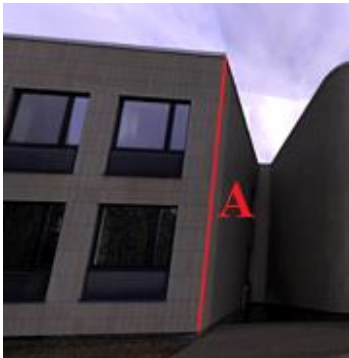



Joonis 5.12. Mõõdistamine „*Measure*“ tööriistaga programmis *Trimble RealWorks*

Referentsmõõduks võeti väljas lindiga mõõdetud distant. Tabelis 5.1 on näha mõõtmiste tulemused.

Tabel 5.1. UAV ja TLS punkipilvedes mõõdetud joonepikkuste ja pindade võrdlus

Objekt	Pilt	Lindiga mõõdetud	UAV punktipilv	TLS punktipilv
A korpuse läänepoolse nurga akna ava mõõdud		A = 2.20 m B = 2.53 m	A = 2,19 m B = 2,50 m	A = 2,20 m B = 2,51 m
Erinevused:			A = 0,01 m B = 0,03 m	A = 0,00 m B = 0,02 m
Fassaadi plaat		A = 0,19 m B = 0,62 m	Tuvastamatu	A = 0,20 m B = 0,62 m
Erinevused:			-	A = 0,01 m B = 0,00 m
Maja lõunapoolse otsa laius fassaadil		A = 16,20 m	A = 16,22 m	A = 16,22 m

Erinevused:			A = 0,02 m	A = 0,00 m
A korpuse läänepoolse nurga fassaadi kõrgus		A = 8,18 m	A = 8,21 m	A = 8,19 m
Erinevused:			A = 0,03 m	A = 0,01 m
Lõunapoolse sisehoovi kaks serva katuselt mõõdetuna		A = 17,01 m B = 17,95 m	A = 16,96 m B = 17,90 m	A = 16,97 m B = 17,93 m
Erinevused:			A = 0,05 m B = 0,05 m	A = 0,04 m B = 0,02 m

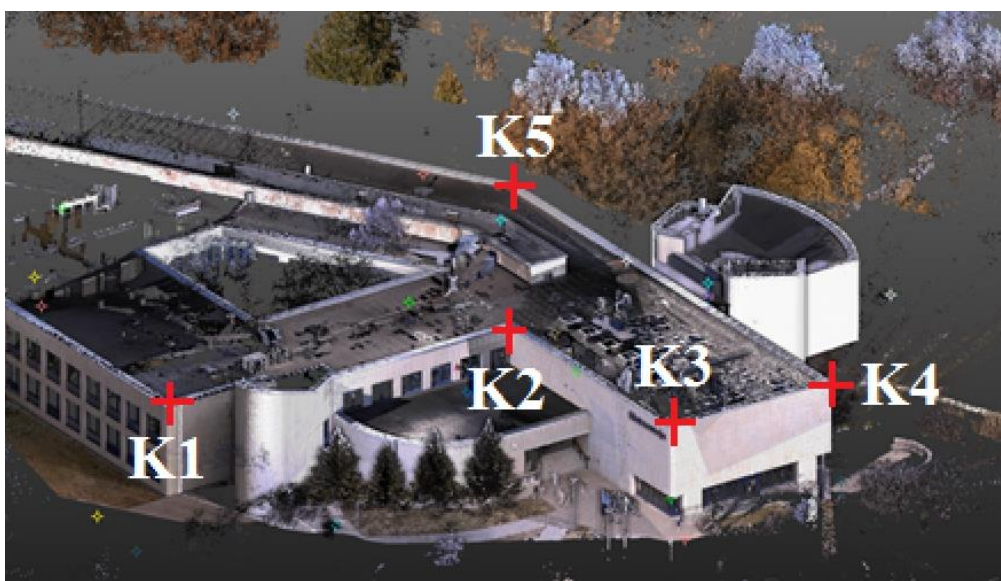
Tabelist selgub, et maksimaalselt erinesid mõõtmised kuni 6 cm. Suuremad erinevused lindiga mõõdetud tulemustega olid fotogramm-meetrilisel meetodil tehtud punktipilvel. Põhjuseks võib tuua liiga hõreda punkitiheduse mistõttu oli raske määratleda õigeid kohti, kust oleks sobilik mõõta. Lisaks mõjutab tulemusi autori käsitsi punktide valimine programmis. Akna ja sisehoovi puhul oli võimalik leida ka pindala väärtused. Akna pindala oli lindiga mõõdetud andmete järgi 5,57 m². UAV punktipilvest mõõdetud joonepikkuste järgi saadi akna pindalaks 5,48 m² ning TLS punktipilve andmetest 5,52 m² mis näitab, et UAV punktipilve kehvast tiheduse tõttu on keeruline parameetrid määrata. Sisehoovi pindala lindiga mõõdetud joonepikkuste järgi oli 305,33 m². UAV ja TLS punktipilve andmetest

vastavalt 303,58 m² ning 304,27 m². Pindalad pole väga suuresti erinevad, mistõttu sobiks sarnane UAV punktipilvest kogutud info sisendiks näiteks renoveerimistöodele, kus arvutataks materjali mahtusi.

Et tulemused oleks usaldusväärsemad, mõõdistati mõlemal mudelil valitud objekte kolm korda ja valiti tulemuste keskmine. Tabel kõigi mõõdistatud pikkuste kohta on välja toodud lisas 2. Võib öelda, et enamasti jäi UAV punkipilve ja lindiga mõõdetud vahemaade erinevused mõne cm piirisse, mis tähendab, et relatiivselt on mudel küllaltki täpne.

5.1. Absoluutse täpsuse hinnang

Töös uuriti ka absoluutset täpsust. Selleks võeti referentsmudeliks terrestrialise laserskaneerimise meetodil mõõdistatud punktipilv. Kontrollitud maja nurgapunktid on välja toodud joonisel 5.13.

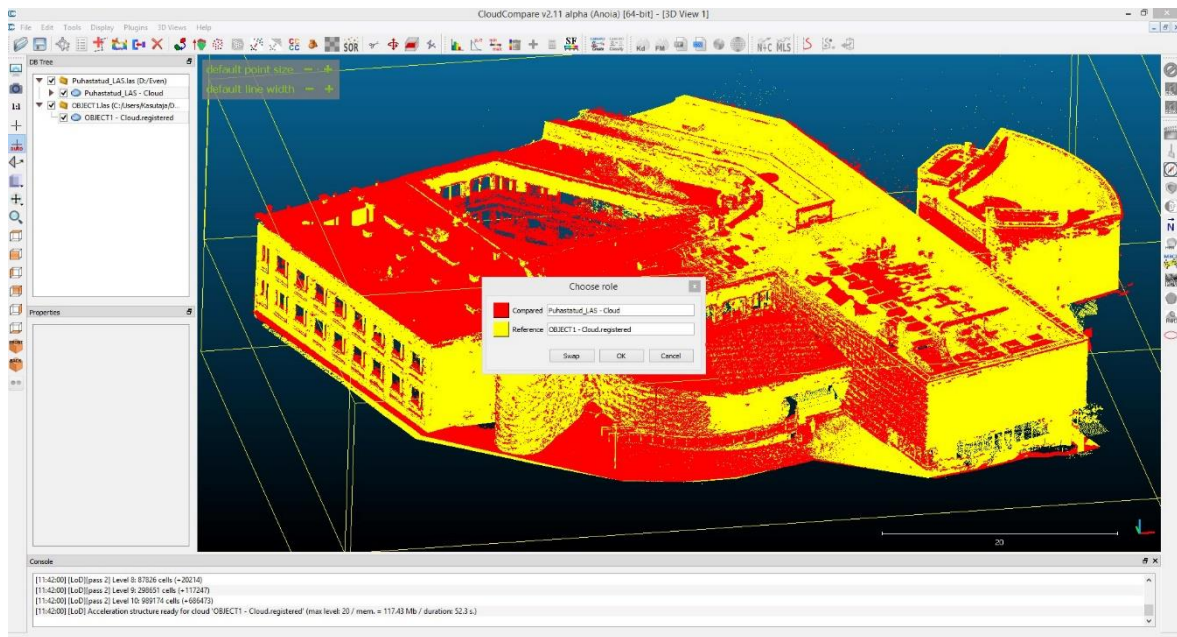


Joonis 5.13. Absoluutse täpsuse kontrolliks valitud maja nurgapunktid

Punktide koordinaadid mõõdeti programmiga *Trimble RealWorks*. Mõõdeti kolm korda ja tulemuseks võeti nende keskmine. Tulemustest selgus, et enamasti erinesid TLS ja UAV punktipilvede vahel nurgapunktid maksimaalselt 5 cm plaaniliselt ja 6 cm kõrguslikult. Keskmiseks erinevuseks saadi plaaniliselt 3 cm ja kõrguslikult 4 cm. Mõõdistatud koordinaadid on välja toodud lisas 3.

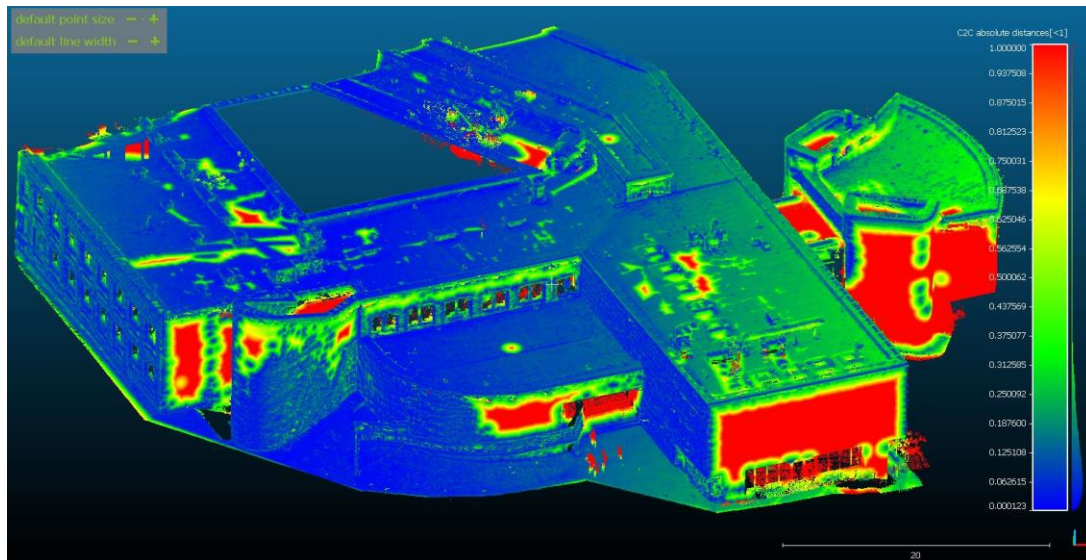
5.2. Kahe punktipilve omavaheline võrdlus programmiga *CloudCompare*

Punktipilvi võrreldi ka programmiga *CloudCompare V2.11*. Tegu on avatud lähtekoodiga vabavara programmiga millega on võimalik võrrelda punktipilvi, mudeleid ja nende erinevusi visuaalselt esitada. Võrdluseks tuli valida referentspind ja võrdluspind (joonis 5.14). Kuna eesmärk oli näidata kõiki erinevusi, siis tehti võrdlev mudel kahel korral vahetades referents- ja võrdlevat pinda ja hiljem pandi mõlemad kokku.



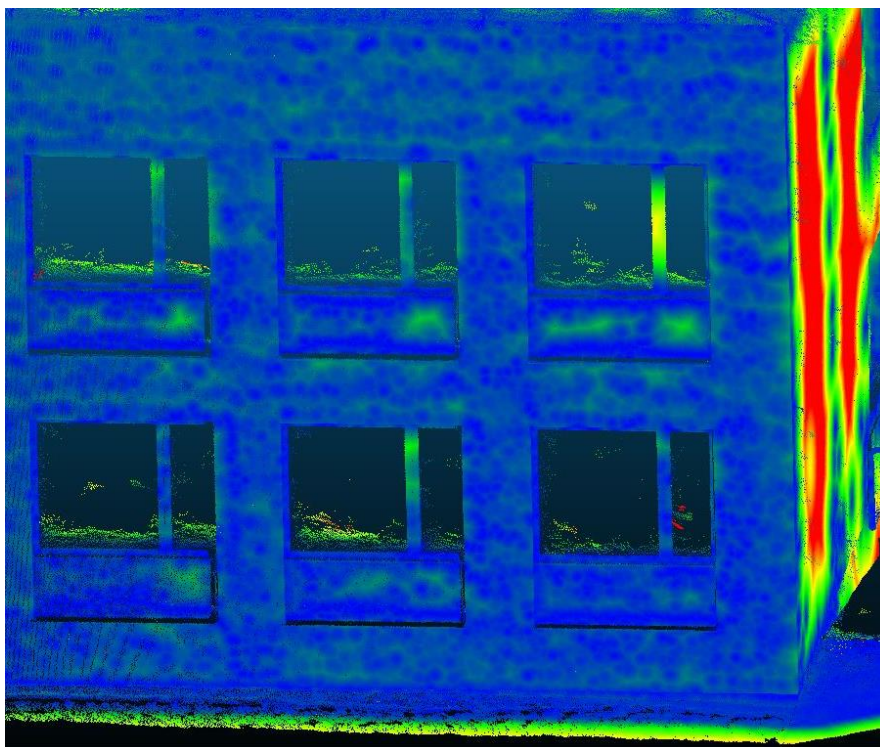
Joonis 5.14. *CloudCompare V2.11* võrdlemisprotsessi algus

Suurimaks takistuseks punktipilvede võrdlemisel oli see, et punktipilved pidid olema perfektselt puhastatud ja ühesuguselt piiritletud. Esimestel võrdlustel genereeris programm värviskaalal maksimaalseks väärtuseks 13 m. Puhastamise tegi raskeks ka terrestrialel laserskaneerimisel tekkinud müra maja sees mis võis olla põhjustatud terrestrialel skaneerimise ajal akna peegeldustest.



Joonis 5.15. *CloudCompare Cloud-to-cloud võrdluse tulemus*

Joonisel 5.15 on kujutatud kahe punktipilve erinevusi. Katusel iseloomustavad punased laigud terrestrialse laserskaneerimise puuduseid. Jooniselt ilmneb, et suuremad vead on katuste sissulatuvaates osades kuhu laserskaneerijaga ei nähtud. Lisaks on katuse pind tehnorajatiste tõttu kohati laiguline. Tasasel pinnal nagu peaukse katus, on näha, et vead on väikesed. Fassaadi punased osad näitavad kohti, kus UAV punktipilve andmestik on puudulik. Lisaks on näha joonisel, et hoone peasissekäigu koht on punane, mis näitab jällegi seda, et seal on UAV punktipilve andmestik puudu. Joonisel 5.16 on suurendatud fassaadi.



Joonis 5.16. *Cloud-to-cloud* võrdluse punktipilv suurendatud fassaadile

Jooniselt on näha, et fassaadil on rohelisi laike. Laigud tulenevad sellest, et UAV punktipilvel paiknevad punktid fassaadil ebaühtlaselt. Parempoolsel seinal on näha punast, mis viitab, et seal oli UAV punktipilvel punktid suuremjaolt puudu.

Tulemuste põhjal võib öelda, et UAV mõõdistamine on sobilik masina kaamera suhtes horisontaalsete pindade mõõdistamiseks nagu näiteks maapind ja lihtsamad katused. Vaatamata sellele, et visuaalselt hinnates oli fassaad piltidelt 70° nurga puhul täielikult näha, oli järeltöötlusprogrammil raskusi vertikaalsetele pindadele punkte tekitada. Võõrkeelsed allikad soovivad maja mõõdistamise puhul lennata hoone kohal orbitaalselt ja kasutada 45° kaamera nurka. Soovitatud meetoodika on mõeldud kasutamiseks lihtsamate elumaja tüüpi hoonetel.

5.3. Meetodite kokkuvõttev arutelu

Töö autori arvates võib UAV punktipilve kehva fassaadi põhjuseks olla:

- Järeltöötlusprogrammi võimekus
- Mittesobilik kaamera nurk
- Päikesevalgusest tekkinud varjud

Autor välistaks lennukõrguse valiku ja riistvara võimekuse, kuna horisontaalsetel pindadel nagu maapind ja katus on punktipilv ühtlane ja tihe. Alternatiivina võib edasisel uurimisel kasutada *UAS Masteri* asemel *Pix4D* või *DroneDeploy* tarkvara ja vaadata, kas punktipilves fassaad paraneb. Teise ettepanekuna tuleks teha UAV-ga lend mis koosneb kahest osast – katuse ja fassaadi pildistamisest (joonis 5.17).



Joonis 5.17. Kahes osas teostatav lend, mille tulemusena võiks saada punktipilves tiheda fassaadi.

Grenzdörffer, Naumann jt (2015) tehti kirikutornist lisapilte kasutades 30° kaamera nurka. Artiklile toetudes võiks lisapiltide tegemine fassaadist olla lahendus. Samuti tuleks parema punktipilve saamise jaoks lennata pilvise ilmaga, et vältida varje. Varjulistesse kohtadesse ei ole osanud järeltöötlusprogramm punkte genereerida.

Autori poolt tehtud punktipilvi võrreldes ilmnevad neil mitmed erinevused. Kuna ka tööprotsessid, seadmed ja ressursikulud on erinevad, koostati ülevaatlik tabel kahe meetodi vahel (tabel 5.2).

Tabel 5.2. UAV ja TLS-i meetodi võrdlus

	UAV (Aerofotogramm-meetriline meetod)	TLS (Terrestrilise laserskaneerimise meetod)
Seade ja selle hind	DJI M200, ca 6000 €	Trimble SX10, ca 55 000 €
Välitööde ajakulu	Markeerimispunktide paigaldus ja mõõdistamine 1 h, lend koos planeerimisega 30 min.	Fassaadi skaneerimine 5 h, katuse skaneerimine 6 h.
Töötluse ajakulu	Markeerimispunktide tähistamine fotodel 1 h. Automaatne punktipilve genereerimine ca 6 h.	Töötlemise vajadus puudub kui skannid on tehtud koordinaatsüsteemis.
Automatiseeritus	Väga automatiseeritud. UAV tõuseb automaatselt õhku, kogub vajalikud andmed ja maandub stardipaika.	Vajab igas seisupunktis skaneeritava ala määramist ja seadistamist.
Punktipilve täpsus ja kvaliteet	Plaaniline ca 3 cm, kõrguslik ca 5 cm. Katus ja maapind detailne. Fassaadil puudub detailsus.	Täpsus oleneb masina orienteerimisest, mille vead jäid enamasti 1 cm piiresse.
Seadmete kasutuslihtsus	Väga lihtne. Hakkama saaks ka teise valdkonna inimene.	Kasutamine eeldab elektrontahhümeetrite kasutuskogemust.

UAV suudab tagada kõige kiiremat infokogumist võrreldes tahhümeetrilise, laserskaneerimise või GNSS mõõdistusmeetodite puhul. UAV-ga mõõdistamise aja-ja ressursikulu on hulga väiksem kui muude alternatiivide kasutamine. Lisaks on protsessi läbiviimine lihtsam ja automatiseeritum. Terrestrilise laserskaneerimise meetod on küll täpsem kuid autori arvates on kindlasti võimalik aerofotogramm-meetriliste mõõdistamiste täpsusi parandada. Autor usub, et aerofotogramm-meetrilisel mõõdistamisel mehitamata õhusõidukiga on suur potentsiaal. Pidev tehnika areng toob sellesse valdkonda paremad kaamerad, lennumasinad ja tarkvarad millest tulenevalt võiks saada kõrgtäpsed punktipilved.

KOKKUVÕTE

Mehitamata õhusõidukite kasutus tsiviilvaldkondades on viimastel aastatel tõusnud hüppeliselt. Populaarsusele on andnud suure tõuke tehnoloogia areng ja sellest tulevalt suudavad tootjad pakkuda tavainimestele taskukohaseid lennumasinaid. Mehitamata õhusõidukeid kasutatakse näiteks põllumajanduses, meelelahutus- ja filmindussektoris, pääste- ja seiretöödel, kaevandustel ja paljudes muudes valdkondades. Innovatiivsed lahendused ja efektiivsed tulemused on need faktorid mida ettevõtjad soovivad – nii ka geodeesias.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli selgitada välja, kas hoonete mitte orbitaalne mõõdistamine aerofotogramm-meetrilisel meetodil UAV-ga on sama täpne, vähem aeganõudvam ja odavam kui elektrontahhümeetri või laserskanneriga mõõdistamine. Eesmärgi saavutamiseks viidi läbi kaks mõõdistamist Eesti Maaülikooli Metsamaja hoonest kasutades aerofotogramm-meetrilist ja terrestrilise laserskaneerimise meetodeid. Aerofotogramm-meetrilisel mõõdistamisel tehtud punktipilve võrreldi referentspinnaks võetud terrestrilisel laserskaneerimisel saadud punktipilvega.

Järeltöötlusprogrammi koostatud raportist ilmnes, et keskmised UAV punktipilve punktide standardvead olid: $X = 3,1$ cm, $Y = 3,3$ cm ja $Z = 5,7$ cm, mis kirjeldab punktipilve relatiivset täpsust. Kontrollpunktide mõõtmiste keskmised ruutvead olid: $X = 1,6$ cm, $Y = 2,1$ cm ja $Z = 3,4$ cm. Lisaks mõõdistati mõned Metsamaja parameetrid lindiga, et võrrelda tulemusi UAV punktipilvega. Suurimad vead olid kuni 6 cm. Visuaalselt oli näha, et UAV punktipilvel oli detailne katus ja maapind kuid kehvem fassaad. Laserskaneeritud punktipilvel oli detailne fassaad, kuid kehvem katus. Töös uuriti ka UAV punktipilve absoluutset täpsust võrreldes TLS punktipilvega. Kontrollpunkte mõõdistades saadi keskmised vead plaaniliselt 3 cm ja kõrguslikult 4 cm.

Tööst selgus, et aerofotogramm-meetria kasutamine hoonete mõõdistamisel on kindlasti kiirem, lihtsam ja odavam alternatiiv kui kasutada elektrontahhümeetrit või laserskannerit. UAV punktipilve kehva tiheduse tõttu hoone fassaadil ei saa selle töö puhul öelda, et aerofotogramm-meetriline meetod on sama täpne kui terrestrilist laserskannerit kasutades. Ohutu, kiire ja lihtsa lennu huvides lennati 50 m kõrgusel, kasutades 70° kaamera nurka. Välismaa artiklites soovitatud orbitaalne lend oleks uuritud objekti puhul keeruline ja võimalik, et ka ohtlik, tulenevalt erinevatest õhuliinidest ja postidest. Sellest tulenevalt

lennati „*grid*“ stiilis trajektooriga, et saada hinnang sellise mõõtmisviisi täpsuse kohta. Sellegipoolest oli ülejäänud punktipilv, väljaarvatud hoone fassaad, täpne ja detailne. Antud parameetridega teostatud lend ja töötlus oleks piisavalt täpne ning sobilik näiteks suurte hoonete puhul ehitusmaterjali mahtude arvutamiseks. Autori arvates on tõenäoline, et andmete puudulikkus hoone fassaadil on põhjustatud kaamera nurga valikust, tugevatest päikesevarjudest või järeltöötlusprogrammi võimekusest vertikaalpindasi töödelda. Sellest tulenevalt teeb autor ettepanekuid edaspidiseks:

- Mõõdistada objekt näiteks 45-60° kaamera nurgaga
- Proovida ühe andmestikuga erinevaid järeltöötlusprogramme nagu DroneDeploy, Pix4D, DroneMapper
- Mõõdistada objekt kahe lennuga, pildistades fassaadi eraldi.

Kuna UAV punktipilve puhul oli peamiseks probleemiks fassaadi detailsus, siis edasise uurimise tulemusena oleks võimalik välja töötada juhend suuremate hoonete aerofotogramm-meetriliseks mõõdistamiseks. Praegu soovitavad võõrkeelsed allikad mõõdistada hoonet orbitaalse lendamise meetodiga, mis suure hoone puhul on küsitav. Autor usub, et aerofotogramm-meetrilisel mõõdistamisel UAV-ga on suur potentsiaal, kuna tarkvarade, lennumasinade ja nende kaamerate areng on tõukeks ideaalsetele punktipilvedele ja mudelitele.

SUMMARY

The usage of unmanned air vehicles in civil services has recently soared. The development of technology has given boost to popularity and therefore the producers can offer affordable air vehicles to ordinary people. Unmanned air vehicles are used for example in agriculture, entertainment, cinematography, rescue, monitoring, mining and in many other fields. Innovative solutions and effective results are the factors that entrepreneurs wish in geodesy too.

The aim of the current Master's thesis was to find out if the non-orbital surveying of the buildings with the help of the UAV is identical, less time consuming and cheaper than surveying with the electron tachometer or the laser scanner. To achieve the purpose two surveys were carried out from Metsamaja of Estonian University of Life Sciences. Methods of aerophotogrammetry and terrestrial laser scanning were used. The point cloud that was surveyed by aerophotogrammetry was compared with the point cloud that was surveyed by terrestrial laser scanning.

The report produced by post processing program showed that the average standard errors of the UAV point clouds were: $X = 3.1$ cm, $Y = 3.3$ cm ja $Z = 5.7$ cm. That describes the relative accuracy of the point cloud. The root mean square errors of the checkpoint were: $X = 1.6$ cm, $Y = 2.1$ cm ja $Z = 3.4$ cm. Additionally, some Metsamaja's parameters were surveyed with the tape in order to compare the results with the UAV point cloud. The biggest errors were up to 6 cm. Visually it was seen that in the UAV point cloud there was a detailed roof and the ground but a worse facade. In the research it was also studied the absolute precision of the UAV point cloud compared to the TLS point cloud. As to surveying the checkpoints the average planning errors were 3 cm and height errors were 4 cm.

The study showed that using aerophotogrammetry in surveying buildings is definitely faster, easier and cheaper than using the electron tachometer or the laser scanner. Because of the worse density of the UAV point cloud on the facade of the building one cannot say according to this study that the method of aerophotogrammetry is as precise as using the terrestrial laser scanner. However, except for the facade of the building, the rest of the point cloud was precise and detailed. In the author's opinion it seems probable that the insufficient data on

the facade of the building has been caused by the choice of the camera angle, the sun's shadow or the ability of the post processing program to process vertical surfaces.

Therefore, the author makes recommendations for future actions:

- Survey the object for example at the camera's angle of 45-60°.
- Try different post processing programs with one dataset, like DroneDeploy, Pix4D, DroneMapper.
- Survey the object during two flights, taking a picture of the facade separately.

As the main problem of the UAV point cloud was the granularity of the facade, then as a result of the further studies it could be possible to work out an instruction for aerophotogrammetric surveying of the larger buildings. At present foreign language sources recommend surveying of the building with the method of orbital flights, which is questionable for a large building. The author believes that there is high potential for UAV aero-photogrammetric surveying, as the development of software, air vehicles and their cameras will lead to ideal point clouds and models. The study showed that using aerophotogrammetry in surveying buildings is definitely faster, easier and cheaper than using the electrontachometer or the laser scanner.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

4 Steps for Making an Excellent 3D Model With a Drone. (2016). DroneDeploy
<https://blog.dronedeploy.com/4-steps-for-making-an-excellent-3d-model-with-a-drone-25dc35f1df62>

5 Ways to Improve the Accuracy of Your Drone Models with 3D Mapping Software.
(2017). DroneDeploy
<https://blog.dronedeploy.com/4-ways-to-improve-the-accuracy-of-your-drone-models-with-3d-mapping-software-adbd8023abe9>

Barbi, G. s.a. Villa Aldrovandi Mazzacurati. Guidobarbi.it
<https://www.guidobarbi.it/il-teatro-di-villa-aldrovandi-mazzacorati-a-bologna/>

Borak, M. (2018). World's top drone seller DJI made \$2.7 billion in 2017. *Technode*.
<https://technode.com/2018/01/03/worlds-top-drone-seller-dji-made-2-7-billion-2017/>

Bosak, K. (2017). *Secrets of UAV photomapping*.
http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf

Buczowski, A. (2017). *How accurate is your drone survey? Everything you need to know*. Geoawesomeness.
<http://geoawesomeness.com/accurate-drone-survey-everything-need-know/>

Carnevali, L., Ippoliti, E., Lanfranchi, F., Menconero, S., Russo, M., & Russo, V.
(2018). Close-range mini-uavs photogrammetry for architecture survey.
<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2/217/2018/isprs-archives-XLII-2-217-2018.pdf>

Datasheet - Trimble R4 GNSS. (2015). Trimble
<https://community.trimble.com/docs/DOC-1243>

*DJI Matrice 200 Serie*c specifications s.a. DJI
<https://www.dji.com/matrice-200-series/info#specs>

DJI Spark. s.a. DJI
<https://www.dji.com/ee/spark>

Dormehl, L. (2018). The history of drones in 10 milestones. *Digitaltrends*.
<https://www.digitaltrends.com/cool-tech/history-of-drones/>

Double Grid Mission Settings. s.a. Pix4D Support

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115001884706--Android-Double-Grid-Mission-Settings>

Egan Airships Introduces Hybrid Plane-Blimp Unmanned Aircraft. (2017).

Unmannedsystemstechnology.

<https://www.unmannedsystemstechnology.com/2017/09/egan-airships-introduces-hybrid-plane-blimp-unmanned-aircraft/>

Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry*.

http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf

Elix-XL Multirotor. s.a. UAV.ee

<http://www.uav.ee/products/elix-xl-multirotor/>

Flight preparation – How to plan your flight mission for best Digital Orthophoto. s.a.

3DSurvey

https://www.3dsurvey.si/upload/files/002%202D%20Orthophoto%20instructions_v002.pdf

Fritz X. s.a. *Wikipedia*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Fritz_X

Trimble SX10. s.a. *Geosoft*.

<https://www.geosoft.ee/tooted/trimble-sx10>

Trimble Inpho UAS Master. s.a. Geospatial

<https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-inpho-uasmaster>

Grenzdörffer, G. J., Naumann, M., Niemeyer, F., & Frank, A. (2015). Symbiosis of uas photogrammetry and tls for surveying and 3d modeling of cultural heritage monuments - a case study about the cathedral of st. Nicholas in the city of greifswald.

<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/91/2015/isprsarchives-XL-1-W4-91-2015.pdf>

Eesti Maaülikooli Kreutzwaldi 5 õppehoone juurdehitise arhitektuurivõistlus. (2008). Tartu.

Propeller Aero launches AeroPoints: game-changing new hardware for accurate drone surveying. (2016). sUASNews

<https://www.suasnews.com/2016/08/propeller-aero-launches-aeropoints-game-changing-new-hardware-accurate-drone-surveying/>

- Oniga, E., Chirilă, C., & Stătescu, F.** (2017). Accuracy assessment of a complex building 3d model reconstructed from images acquired with a low-cost uas.
<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W3/551/2017/>
- Oniga, V. E., Beraban, A. I., & Statescu, F.** (2018). Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images.
https://www.researchgate.net/publication/323965828_Determining_the_Optimum_Number_of_Ground_Control_Points_for_Obtaining_High_Precision_Results_Based_on_UAS_Images
- Overlap Reports.* (2019). Dronesmadeeasy
<https://support.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/articles/207148006-Overlap-Reports>
- Parrot AR 1.0. s.a. *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Parrot_AR.Drone#/media/File:Ardone-img5-front.jpg
- Phantom. s.a. *DJI*.
<https://www.dji.com/ee/phantom>
- Global market for commercial applications of drone technology valued at over \$127bn.* (2016). PwC
https://pwc.blogs.com/press_room/2016/05/global-market-for-commercial-applications-of-drone-technology-valued-at-over-127bn.html
- Raczynski, R. J.** (2017). *Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters*. Norwegian University of Science and Technology.
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2452453>
- Rakha, T., & Gorodetsky, A.** (2018). Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones.
https://www.researchgate.net/publication/327372324_Review_of_Unmanned_Aerial_System_UAS_applications_in_the_built_environment_Towards_automated_building_inspection_procedures_using_drones
- Remote Piloted Aerial Vehicles : An Anthology.* s.a. RPAV
http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html#Beginnings

RQ-4 Global Hawk. (2014). Air Force

<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104516/rq-4-global-hawk/>

Selecting the Image Acquisition Plan Type. s.a. Support.Pix4D

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type#label4>

Sõdur. (2014). Droonid - Kas sõjanduse tulevik?

<https://issuu.com/sodur/docs/sodur0314>

The Predator's Ancestor - UAV's in The Great War. (2012). Warnepieces

<http://warnepieces.blogspot.com/2012/07/the-predators-ancestors-uavs-in-great.html>

Stream C UAS. s.a. Threod Systems

<https://threod.com/product/stream-c-uas/>

Trimble SX10. s.a. Allikas: Geospatial.Trimble

<https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-sx10>

Types of Drones – Explore the Different Models of UAV's. s.a. *Circuitstoday*.

<http://www.circuitstoday.com/types-of-drones>

What is Ground Sample Distance (GSD) and How Does it Affect Your Drone Data?

(2018). Propelleraero

<https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/>

LISAD

Lisa 1. Georefereerimise tulemused



UAS_3D

Block adjustment results

Accuracy

Sigma naught	3.3518 [micron]
	1.3895 [pixel]

Mean standard deviation of translations

X [m]	Y [m]	Z [m]	Total [m]
0.0074	0.0073	0.0075	0.0128

Mean standard deviation of rotations

Omega [deg/1000]	Phi [deg/1000]	Kappa [deg/1000]
9.1687	8.7277	4.7474

Mean standard deviation of object points

X [m]	Y [m]	Z [m]	Total [m]
0.0306	0.0331	0.0572	0.0728

RMS values for GNSS

X [m]	Y [m]	Z [m]	Total [m]
---	---	---	---

RMS values for IMU

Omega (X) [deg]	Phi (Y) [deg]	Kappa (Z) [deg]
---	---	---

Object control points

Object control points from project

ID	Type	X	Y	Z	Unit	Remark
1	Full	657595.3490	6475505.3850	57.1290	m	
10	Full	657557.3470	6475462.6590	49.0080	m	
11	Full	657622.9580	6475462.1130	47.7380	m	
12	Full	657588.1430	6475530.9940	46.3890	m	
13	Full	657512.4730	6475615.7460	46.1590	m	
14	Full	657452.6350	6475631.0060	48.3570	m	
15	Full	657470.4540	6475533.8250	48.9370	m	
2	Full	657600.5360	6475478.0000	56.9250	m	
3	Full	657552.3210	6475493.9610	57.1910	m	
4	Full	657515.4750	6475533.9450	57.1110	m	
5	Full	657437.6660	6475614.2800	57.2780	m	
6	Full	657481.8090	6475632.3690	56.8440	m	
7	Full	657514.7890	6475575.7810	57.3890	m	
8	Full	657573.3090	6475530.2760	57.0980	m	
9	Full	657509.6390	6475499.3200	49.2210	m	
Minimum		657437.6660	6475462.1130	46.1590	m	selected system
Maximum		657622.9580	6475632.3690	57.3890	m	selected system
Area		185.2920	170.2560	11.2300	m	selected system

List of 15 object control points defined in the project file. Statistics defined in the selected coordinate system.

Lisa 2. Relatiivse täpsuse uurimisel mõõdetud joonepikkused. Ühikud meetrites.

	Lindiga		UAV		TLS	
	A	B	A	B	A	B
A korp. Aken			2,17	2,52	2,19	2,51
			2,22	2,48	2,2	2,5
			2,19	2,5	2,2	2,51
Tulem	2,2	2,53	2,19	2,5	2,20	2,51
Fassaadi plaat					0,21	0,63
			Tuvastamatu		0,19	0,62
					0,21	0,61
Tulem	0,19	0,62	-	-	0,20	0,62
Maja lõunapoolse otsa fassaad			16,21		16,2	
			16,24		16,19	
			16,18		16,21	
Tulem	16,2		16,21		16,2	
A korpuse läänepoolse nurga kõrgus			8,21		8,18	
			8,24		8,18	
			8,19		8,2	
Tulem	8,18		8,21		8,19	
Lõunapoolse sisehoovi kaks serva katuselt mõõdetud			16,9	17,88	16,92	17,96
			16,97	17,91	17,03	17,92
			17,02	17,9	16,96	17,92
Tulem	17,01	17,95	16,96	17,90	16,97	17,93

Lisa 3. Absoluutse täpsuse uurimisel mõõdistatud koordinaadid

	TLS			UAV		
Punkt	X	Y	Z	X	Y	Z
	6475482,00	657554,32	57,82	6475482,04	657554,36	57,88
K1	6475482,01	657554,30	57,81	6475482,01	657554,29	57,86
	6475482,01	657554,30	57,81	6475482,00	657554,34	57,87
Keskmine	6475482,00	657554,31	57,81	6475482,02	657554,33	57,87
Vahe (m)*	0,02	0,02	0,06			
	6475492,34	657585,61	57,74	6475492,35	657585,64	57,81
K2	6475492,35	657585,60	57,75	6475492,40	657585,68	57,77
	6475492,32	657585,60	57,74	6475492,35	657585,64	57,81
Keskmine	6475492,34	657585,60	57,74	6475492,37	657585,65	57,80
Vahe (m)	0,03	0,05	0,05			
	6475470,35	657595,14	57,75	6475470,32	657595,12	57,79
K3	6475470,34	657595,12	57,73	6475470,32	657595,12	57,79
	6475470,35	657595,14	57,75	6475470,30	657595,11	57,77
Keskmine	6475470,35	657595,13	57,74	6475470,31	657595,12	57,78
Vahe (m)	0,03	0,02	0,04			
	647547,85	657610,00	57,72	647547,83	657610,03	57,78
K4	647547,85	657610,00	57,72	647547,83	657610,03	57,78
	647547,85	657610,00	57,72	647547,80	657609,97	57,70
Keskmine	647547,85	657610,00	57,72	647547,82	657610,01	57,75
Vahe (m)	0,03	0,01	0,03			
	6475520,10	657591,09	57,78	6475520,06	657591,03	57,82
K5	6475520,08	657591,06	57,77	6475520,04	657591,07	57,77
	6475520,10	657591,09	57,78	6475520,06	657591,03	57,82
Keskmine	6475520,09	657591,08	57,78	6475520,05	657591,04	57,80
Vahe (m)	0,04	0,04	0,03			

* - Vahe (m) tähistab TLS ja UAV punktide koordinaatide erinevust ($X^{TLS} - X^{UAV}$, $Y^{TLS} - Y^{UAV}$, $Z^{TLS} - Z^{UAV}$)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, EVEN KIRS,

(sünnipäev pp/kuu/aa 18.01.1995)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Hoone aerofotogramm-meetiline mõõdistamine UAV-ga,

mille juhendaja on dotsent Aive Liibusk,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

- 2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
- 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 3.06.2019

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)